



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN GEOGRAFÍA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL DE LOS PAISAJES
AGRÍCOLAS DEL ESTADO DE PUEBLA, MÉXICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
ÁNGEL DAVID FLORES DOMÍNGUEZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. ÁNGEL G. PRIEGO SANTANDER
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
DRA. MARTA ASTIER CALDERÓN
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL UNAM

DR. JESÚS ARMANDO RUÍZ CAREAGA
INSTITUTO DE CIENCIAS BUAP

MÉXICO, D. F. ENERO 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE GENERAL

	Página
RESUMEN.	1
ABSTRACT.	2
CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES.	3
1.1 INTRODUCCIÓN.	3
1.2 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.	6
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.	8
1.3.1 Objetivo general.	8
1.3.2 Objetivos particulares.	8
1.4 ANTECEDENTES.	9
CAPÍTULO 2. ENFOQUE TEÓRICO-CONCEPTUAL.	12
2.1 GEOECOLOGÍA DEL PAISAJE.	12
2.2 DESARROLLO SUSTENTABLE.	15
2.3 SUSTENTABILIDAD GEOECOLÓGICA DEL PAISAJE.	17
CAPÍTULO 3. ENFOQUE METODOLÓGICO.	20
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL ESTADO DE PUEBLA.	21
3.1.1 Contexto geográfico.	21
3.1.2 Contexto de la agricultura en Puebla.	23
3.1.3 Contexto ambiental.	26
3.2 DISEÑO METODOLÓGICO.	27
3.2.1 Delimitación de unidades de paisaje a escala 1:250,000.	27
3.2.2 Evaluación del potencial natural para la agricultura.	29
3.2.3 Compatibilidad Agrícola del Paisaje.	34
3.2.4 Estado Ambiental del Paisaje.	36
3.2.5 Sustentabilidad Ambiental del Paisaje.	43
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	45
4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA DEL PAISAJE EN PUEBLA	45

1.1.1 Unidades de paisaje.	54
4.2 POTENCIAL NATURAL DEL PAISAJE PARA LA AGRICULTURA.	60
4.2.1 Potencial del relieve.	60
4.2.2 Potencial climático.	62
4.2.3 Potencial edáfico.	63
4.2.4 Potencial natural para la agricultura de temporal.	65
4.3 COMPATIBILIDAD AGRÍCOLA DEL PAISAJE.	69
4.4 ESTADO AMBIENTAL.	74
4.4.1 Problemas ambientales.	74
4.4.2 Evaluación de la Estabilidad Funcional del Paisaje.	80
4.5 SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL DE PAISAJES AGRÍCOLAS.	96
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	102
BIBLIOGRAFÍA.	105

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ubicación geográfica del Estado de Puebla, México.	22
Figura 2. Esquema de integración de información para la construcción del mapa de paisajes.	28
Figura 3. Distribución de los paisajes agrícolas de temporal en el Estado de Puebla	35
Figura 4. Esquema de evaluación de la sustentabilidad ambiental.	44
Figura 5. Mapa de tipos de relieve en el Estado de Puebla.	48
Figura 6. Mapa de tipos climáticos en el Estado de Puebla.	49
Figura 7. Mapa de tipos litológicos en el Estado de Puebla.	50
Figura 8. Mapa de clases de pendiente del terreno en el Estado de Puebla.	51
Figura 9. Mapa de cobertura vegetal-uso del suelo en el Estado de Puebla.	52
Figura 10. Mapa de tipos de suelo principales en el Estado de Puebla.	53
Figura 11. Mapa de la distribución de las cinco principales unidades de paisaje en el Estado de Puebla.	57
Figura 12. Reducción del mapa de paisajes físico-geográficos del Estado de Puebla	58
Figura 13. Potencial natural del relieve para la agricultura de temporal en el Estado de Puebla.	61
Figura 14. Mapas de potencial climático para los principales cultivos de temporal en Puebla.	64
Figura 15. Mapas de potencial edáfico para los principales cultivos de temporal en Puebla.	64
Figura 16. Mapa de potencial general del paisaje para la agricultura de temporal en el Estado de Puebla.	67
Figura 17. Superficie con potencial natural agrícola adecuado en cada componente estructural del paisaje.	68
Figura 18. Mapa de distribución de la compatibilidad agrícola de los paisajes de Puebla.	72
Figura 19. Superficie abarcada por los paisajes altamente compatibles en cada componente específico del paisaje.	73
Figura 20. Superficie abarcada por los paisajes medianamente compatibles en cada componente específico del paisaje.	73

Figura 21. Superficie abarcada por los paisajes incompatibles en cada componente específico del paisaje.	74
Figura 22. Mapa de degradación del suelo.	75
Figura 23. Gráfica de degradación del suelo donde se muestra para cada categoría de degradación la proporción que corresponde a los tipos de erosión.	77
Figura 24. Mapa de distribución de las categorías de antropización de la cobertura vegetal del suelo.	79
Figura 25. Categorías de antropización de la cobertura vegetal del suelo y proporción de cada tipo de vegetación-uso del suelo al interior.	80
Figura 26. Mapas y gráficas de la superficie para indicadores de geodiversidad y área de cada categoría.	82
Figura 27. Patrón de riqueza de paisajes en relación a los componentes del paisaje	83
Figura 28. Gráficos de dispersión entre variables correlacionadas de geodiversidad-fragilidad y biodiversidad.	86
Figura 29. Mapa de biogeodiversidad.	87
Figura 30. Patrón de Singularidad de paisajes en relación a los componentes del paisaje.	89
Figura 31. Mapas de distribución de A) singularidad del paisaje, B) presencia de endemismos de fauna y C) presencia de endemismos de flora.	90
Figura 32. Mapa de distribución de la Fragilidad del paisaje.	92
Figura 33. Mapa de distribución de la Estabilidad Funcional del Paisaje.	94
Figura 34. Mapa de distribución del Estado Ambiental del Paisaje.	95
Figura 35. Mapa de distribución de la sustentabilidad ambiental de paisajes agrícolas en el Estado de Puebla.	101

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Variantes del enfoque de paisaje.	15
Cuadro 2. Principales cultivos en Puebla y su superficie abarcada.	24
Cuadro 3. Niveles jerárquicos, definición y criterios de diagnóstico de las unidades de paisaje.	29
Cuadro 4a. Criterios del potencial del relieve evaluados para la agricultura y categorías de potencial.	32
Cuadro 4b. Criterios de potencial climático para diferentes cultivos en temporal. .	32
Cuadro 4c. Criterios de potencial edáfico para diferentes cultivos en temporal. . .	33
Cuadro 5. Valoración de la compatibilidad agrícola del paisaje.	34
Cuadro 6. Enfoque teórico para determinar el Estado Ambiental del Paisaje.	36
Cuadro 7. Valor de ponderación para diferentes tipos e intensidades de erosión del suelo.	38
Cuadro 8. Clases de cobertura vegetal del suelo y valores de ponderación de acuerdo al grado de transformación antrópica que presentan.	40
Cuadro 9. Indicadores empleados para el cálculo de Geodiversidad del paisaje. . . .	41
Cuadro 10. Estructura jerárquica y superficie (km ²) de los componentes paisajísticos en el Estado de Puebla.	59
Cuadro 11. Superficie (km ²) abarcada por cada categoría de potencial del relieve para la agricultura.	62
Cuadro 12. Superficie (km ²) abarcada por categoría de potencial edáfico y climático para todos los cultivos.	65
Cuadro 13. Coeficiente de correlación (R ²) entre atributos de Geodiversidad-Singularidad con indicadores de biodiversidad.	85
Cuadro 14. Categorías de Biogeodiversidad y conformación de las variables que las definen.	86
Cuadro 15. Superficie de las categorías de Fragilidad del paisaje y variables que las definen.	91
Cuadro 16. Categorías de Estabilidad Funcional y valores de los atributos que las definen.	93

Cuadro 17. Categorías de Estado Ambiental y valores de los atributos que las definen.	95
Cuadro 18. Superficie (km ²) para cada categoría de sustentabilidad ambiental de los paisajes agrícolas y valores de los atributos que las definen.	97

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar la sustentabilidad ambiental de paisajes con agricultura de temporal en el Estado de Puebla, México, dada la importancia estatal de esta actividad y la ocurrencia de problemas ambientales relacionados con la agricultura, lo cual no se ha evaluado a nivel del paisaje.

La evaluación incluyó: 1) delimitar unidades físico-geográficas de paisajes a escala 1:250000; 2) valorar el potencial natural para la agricultura de temporal; 3) identificar paisajes incompatibles (alto uso agrícola y bajo potencial); 4) caracterizar el estado ambiental (integrando degradación del suelo-vegetación con diversidad biológica-geográfica) y 5) evaluar sustentabilidad de paisajes agrícolas (integrando estado ambiental y compatibilidad agrícola).

Existe una alta complejidad geomorfológica del territorio con dominancia de montañas, lomeríos; 11 tipos litológicos prevaleciendo los depósitos aluviales y 16 tipos climáticos abundando el templado subhúmedo. Se delimitaron 291 unidades superiores de paisaje y 717 inferiores, diferenciadas por su geología-geomorfología-clima. El potencial agrícola consideró requerimientos edafoclimáticos y de relieve de 10 cultivos, incluido el maíz. Se encontró que 55% del Estado hay potencial agrícola, pero únicamente 7% se usa para la agricultura de temporal. Caso contrario, 12% son paisajes con bajo potencial pero se utilizan para la agricultura. Ambientalmente, en 60% del Estado no hay degradación del suelo y 19% tiene alta degradación. La pérdida de la vegetación natural afecta a 35% y 43% posee vegetación altamente conservada. La heterogeneidad o Geodiversidad fue mejor representada por la Riqueza de Paisaje (60% del Estado con alta riqueza). La Geodiversidad podría condicionar la biodiversidad, ya que se encontró correlación estadística de Geodiversidad con riqueza de flora ($R^2 = 0.58$) y riqueza de fauna ($R^2 = 0.57$). La evaluación del Estado Ambiental reveló que 62% posee alta estabilidad y 11% inestabilidad. Finalmente la evaluación de sustentabilidad indicó que 67% de la superficie agrícola son paisajes sustentables-altamente sustentables y 23% escasamente sustentables-no sustentables.

Se concluye que la evaluación presentada, demuestra que el conocimiento de la conformación físico-geográfica del paisaje y sus potenciales de uso, ofrecen herramientas científicas para la planificación y el ordenamiento territorial, así como el soporte de evaluaciones ambientales y la construcción de políticas de conservación y gestión de la biodiversidad.

ABSTRACT

This research focuses on assessing the environmental sustainability of rainfed agricultural landscapes in Puebla, Mexico. The assessment includes: 1) delineate physical landscapes geographic units at 1: 250,000; 2) assess the natural potential for rainfed agriculture; 3) identification of incompatible landscapes (high agricultural use with low potential, 4) characterize the environmental stability of the landscape (integrating land degradation-vegetation with biological-geographic diversity) and 5) to evaluate sustainability of agricultural landscapes (integrating environmental stability and agricultural compatibility). Puebla has high geomorphological complexity (mountains and hillocks dominate); 11 lithological types prevailing alluvial deposits and 16 climates with humid temperate dominance. Landscape units were defined by upper (291) and lower level (717), distinguished by their geology-geomorphology-climate. The agricultural potential was built with the soil and climate and relief needs of 10 crops, including maize. It was found that 55% of state has agricultural potential, but only 7% is used for rainfed agriculture. Otherwise, 12% are landscapes with low potential but are used for agriculture. Environmentally, 60% of the area has low soil degradation and 19% have high degradation. The loss of natural vegetation affects 35% and 43% have highly conserved vegetation. Landscape heterogeneity (Geodiversity) was best predicted by Landscape Richness Index (60% of the state with high value). Geodiversity could condition biodiversity as Geodiversity statistical correlation was found with plant species ($R^2 = 0.58$) and fauna ($R^2 = 0.57$). According to environmental stability, it was shown that 62% have high stability and 11% have unstable conditions. Finally, the sustainability assessment indicated that the sustainable-highly sustainable landscapes occur in 67% of the agricultural area, while poorly sustainable-unsustainable occur in 23%. It concludes that this research shows that knowledge of the physical-geographical landscape structure and its potential use, offer scientific tools for environmental planning and land use. In addition, they provide the basis for environmental assessments that allow the construction of conservation policies and management of biodiversity.

Palabras Clave

Sustentabilidad Ambiental, Paisajes de Puebla, Geoecología del Paisaje, Agricultura de temporal

CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES

1.1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el aumento de la población y la irracionalidad en los patrones de uso-consumo de los recursos naturales, han provocado una crisis ambiental mundial que amenaza la sustentabilidad en todas sus dimensiones, económica, social, cultural, política y ambiental (Durán 2012). La demanda de recursos y espacio para producir alimentos o materias primas, es un factor que puede llevar al límite las capacidades de los paisajes para cumplir dicha función social y eventualmente a su degradación ambiental. En este sentido, es común observar paisajes que han disminuido o perdido su potencial agrícola debido al agotamiento de sus recursos naturales, lo que conlleva a la búsqueda de nuevos espacios para producir en lugares en donde el potencial podría ser limitado.

Frecuentemente, se cuestiona la persistencia de parcelas agrícolas campesinas con baja tecnificación, donde el manejo de la tierra se hace principalmente mediante labranza y fertilización tradicional, debido a que la producción e ingresos obtenidos por la venta de la cosecha, no son competitivos frente a los sistemas agrícolas modernos, altamente tecnificados, en donde el objetivo principal es producir cultivos con alto valor económico, principalmente, para exportación y así contribuir a la generación de riqueza (Otero 2004). Posiblemente, la intensificación y tecnificación del campo permitan economizar la superficie agrícola y disminuir la expansión de la frontera agrícola hacia zonas forestales (Green *et al.* 2005; Phalan *et al.* 2011). Sin embargo, la agricultura intensiva requiere mayor aporte de agroquímicos, exponiendo los acuíferos al riesgo de contaminación por residuos, además de fomentar la dependencia del productor ante insumos externos sin los cuales la tierra no producirá (Ferreira *et al.* 2012, Baležentienė 2010, Harvey *et al.* 2008). Dado que en estos sistemas se privilegia la producción, la conservación o restauración de las propiedades estructurales y agroecológicas del paisaje pasa a segundo término (del Val *et al.* 2013) y es común que especies silvestres asociadas a los cultivos desaparezcan, muchas de las cuales en los sistemas tradicionales se usan como complemento de la

alimentación o medicinalmente por pobladores locales (González-Amaro *et al.* 2009, Moreno-Calles *et al.* 2013). Otras sirven como insecticidas naturales o bien sirven como refugio de especies polinizadoras. Otro beneficio de los agroecosistemas campesinos que se puede perder en la agricultura intensiva es la conectividad en el paisaje por la conformación de una matriz agrícola-forestal, lo cual le confiere alta heterogeneidad ambiental (Harvey *et al.* 2008). No obstante, se debe considerar que en áreas con agricultura campesina también se presentan problemas ambientales como la erosión, específicamente cuando se practica agricultura en laderas (Ruíz-Careaga *et al.* 2004 y 2005).

Tomar decisiones sobre el manejo del paisaje anteponiendo criterios económicos puede generar problemas en el mediano y largo plazo, que implican altos costos sociales y económicos, así como degradación ambiental que afecta principalmente a países en desarrollo en los que la asignación de recursos para disminuir o revertir los daños al ambiente es limitada (de la Fuente y Suárez 2008). En este contexto, los involucrados en la planificación y manejo del paisaje, deben basarse en instrumentos de evaluación ambiental adecuados que les permitan dimensionar las posibilidades y limitaciones para el manejo del territorio con bases sustentables. Planificar el uso sustentable de la tierra involucra evaluar sistemáticamente el potencial de sus recursos naturales y su dinámica espacio-temporal, las alternativas de aprovechamiento y las condiciones socioeconómicas, lo cual permitirá seleccionar la mejor opción, además de satisfacer las demandas sociales y el disfrute del recurso en el corto, mediano y largo plazo (de Groot 2006, Drozdov 2007, Bocco *et al.* 2010a, Bastian *et al.* 2012).

Sin embargo, muchas veces la información requerida no siempre está disponible en la escala geográfica y temporal adecuada. Ante esta situación las evaluaciones simples que permitan combinar el conocimiento experto con el uso de indicadores, ofrecerán herramientas sólidas para valorar los usos y limitaciones del territorio con bases sustentables, prácticas y de fácil aplicación.

Ante la relevancia mundial que cobró desde mediados del siglo pasado el tema ambiental y su protección, se planteó el modelo de desarrollo sustentable como

paradigma productivo, conservacionista y de bienestar social, con la consigna de que estos beneficios no comprometan el bienestar de las futuras generaciones. A partir de su aparición en el discurso internacional en 1987 (WCDE 1987), el término desarrollo sustentable ha sido incluido desde 1992 en las políticas de desarrollo de la mayor parte de países miembros de la ONU¹ para replantear sus estrategias de producción de riqueza y la explotación de los recursos naturales.

Paralelo a la aparición de la sustentabilidad, se desarrollaron enfoques científicos para validar el uso sustentable de la naturaleza y sus recursos. En relación a la agricultura, existen marcos de análisis que permiten evaluar en diferentes escalas, los sistemas productivos reconociendo los límites agroecológicos, las demandas del mercado y el beneficio social y económico, con la posibilidad de identificar puntos críticos en el sistema y definir estrategias para su mejora (Astier y González 2008).

El gobierno de México firmó en el año 2000 los compromisos del milenio (Gobierno de la República 2005), en donde el compromiso siete se enfoca en garantizar la sostenibilidad del ambiente, medida en la calidad de los recursos naturales como vegetación, suelo, agua, aire y con el reto de plantear estrategias que permitan la inclusión de actividades productivas como la agricultura con bases sustentables, debido a su importancia para la economía y alimentación de muchas comunidades rurales. Sin embargo después de una década, los indicadores seleccionados para medir la sostenibilidad ambiental muestran escasos avances e incluso retrocesos. De acuerdo al informe de la situación ambiental en México (SEMARNAT 2013) donde se analizan el desempeño de indicadores ambientales en las dos últimas décadas, la superficie anual de selva degradada ha aumentado, la superficie con uso agropecuario se ha expandido continuamente, la frecuencia de incendios y la superficie anual dañada se han mantenido constantes, casi la mitad del territorio contiene suelos degradados y una tercera parte de esta superficie es por actividades agropecuarias. Así mismo, Bollo-Manent *et al.* 2014 encontraron que la mitad del territorio mexicano presenta evidencias de intensos procesos

¹ Organización de las Naciones Unidas

de degradación de sus recursos naturales lo que seguramente está alterando las funciones ecosistémicas y ambientales de los paisajes.

Ante esta panorámica, este trabajo tiene como propósito presentar una propuesta teórico-metodológica para evaluar la sustentabilidad ambiental de los paisajes agrícolas. La investigación se centra en los paisajes del Estado de Puebla, México, dado que la superficie estatal que se dedica a la agricultura es de las mayores en comparación con todas las entidades del país (~1.2 millones de hectáreas). En este Estado se han documentado graves problemas de degradación de suelos, agua y vegetación que se asocian a la actividad agrícola (Ruíz-Careaga *et al.* 2004 y 2005, SMRN 2005, Alvarado-Carmona *et al.* 2006, Santacruz 2014); existen también problemas de índole social como la alta incidencia de pobreza que afecta a más de 60% de sus habitantes (CONEVAL 2012) y alto grado de marginación poblacional (CONAPO 2011).

1.2 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En un contexto global, los ecosistemas de América Latina y el Caribe son fundamentales para la provisión de diferentes servicios ambientales como el mantenimiento de la biodiversidad o el almacenamiento de dióxido de carbono entre otros. Sin embargo la precariedad del nivel de vida de gran parte de sus habitantes puede llevar al uso insostenible de sus recursos naturales (ONU 2010).

El uso del territorio requiere el diseño e implementación de marcos de evaluación ambiental que permitan tener un diagnóstico de las capacidades de provisión de bienes y servicios de los recursos, así como la identificación de conflictos ambientales derivados de su uso insustentable (Bastian 2012). La información resultante del análisis permitirá planificar acciones de aprovechamiento en paisajes con base en su potencial y definir usos alternativos o bien estrategias de restauración y conservación en aquellos con degradación evidenciada en disminuciones de la capacidad productiva de la tierra (Kairis *et al.* 2013, Banco Mundial 2008), o la pérdida de biodiversidad y agrobiodiversidad (Ferreira *et al.* 2012, Baležentienė 2010, Harvey *et al.* 2008).

Partiendo de estas premisas, esta investigación evalúa la sustentabilidad ambiental de los paisajes agrícolas del Estado de Puebla a escala regional o semidetallada (1:250 000). Esta escala comúnmente se emplea en los estudios de ordenamiento y planificación territorial, además de existir alta disponibilidad de cartografía ambiental para todo el país.

Puntualmente, con esta investigación se busca responder las siguientes preguntas:

- 1) ¿Cuáles paisajes en Puebla tienen potencial para la agricultura y que uso se les da actualmente?
- 2) Cuando existe incompatibilidad entre el uso actual y potencial agrícola, ¿cómo afecta esta problemática la estabilidad natural de los paisajes?
- 3) ¿Cómo es la relación espacial entre los paisajes agrícolas y factores ambientales como la heterogeneidad geoecológica y la diversidad biológica?
- 4) ¿Qué paisajes agrícolas en Puebla se utilizan con bases sustentables en términos ambientales y cómo se distribuyen geográficamente?

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

1.3.1 Objetivo general.

Evaluar la sustentabilidad ambiental de los paisajes agrícolas del Estado de Puebla, México a escala 1:250 000.

1.3.2 Objetivos particulares

- Clasificar tipológicamente los paisajes naturales de Puebla a partir de un enfoque físico-geográfico.
- Evaluar el potencial agrícola de unidades de paisaje en Puebla y la Compatibilidad Agrícola de unidades con agricultura de temporal.
- Evaluar el Estado Ambiental de paisajes naturales a partir de atributos como la heterogeneidad geoecológica, la diversidad biológica y la degradación de suelos y vegetación.
- Determinar el grado de Sustentabilidad Ambiental de paisajes utilizados para la agricultura de temporal.

1.4 ANTECEDENTES

A partir de la experiencia de varios países, la FAO² propuso una metodología para la delimitación de zonas agroecológicas evaluando la capacidad productiva de la tierra según las propiedades del suelo, clima y relieve. En este método se establecen grandes zonas agroecológicas definiendo para cada zona, las posibilidades y restricciones para el uso agrícola, ganadero y forestal o de conservación (FAO 1976, 1983, 1985, 1997) y más recientemente se incluyó la posibilidad y limitaciones por el uso de agroquímicos (FAO 2007). Otro enfoque considerado pionero lo desarrolló el USDA³ (Klingebiel y Montgomery 1961) el cual pone mayor énfasis en analizar las propiedades edáficas del suelo para determinar niveles de aptitud para la agricultura, sin embargo, su implementación está limitada a la disponibilidad de todos los parámetros edáficos que requiere el marco de evaluación.

En México se han implementado diversas investigaciones para evaluación de tierras tomando como referentes conceptuales los marcos previamente citados. Ritter-Ortíz *et al.* (1999) hicieron una clasificación de la productividad energética de la tierra en el Estado de Tlaxcala, a partir de variables climáticas. En Puebla, Ruíz-Careaga *et al.* (2005) delimitaron zonas agroecológicas en la sierra del norte e identificaron problemas ambientales derivados de la agricultura en laderas, en un contexto de alta pobreza y marginación social. También para la sierra norte, Alvarado-Carmona *et al.* (2006) caracterizaron el potenciales del suelo para la agricultura, ganadería, silvicultura, alfarería y ecoturismo, con base en ese potencial, evaluaron el deterioro del suelo por incompatibilidad entre el uso potencial y el que se le da. Una síntesis evolutiva de los principales métodos de valoración de la tierra usados a nivel mundial, se puede consultar en De la Rosa y van Diepen (2003), Rossiter (2003), Verheye (2003) y Mendoza *et al.* (2010).

En años recientes se ha dado una revaloración del concepto de paisaje y sus métodos debido a su integralidad para el análisis de la relación sociedad-naturaleza y el pragmatismo para hacer evaluaciones ambientales. Desde un contexto geográfico, la

² Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación

³ Departamento de Agricultura de los Estados Unidos

evaluación de tierras incorporando unidades de paisaje ha cobrado importancia en los últimos años (Fregoso *et al.* 2001, García-Romero 2002, Antrop 2004, Mateo-Rodríguez y Da Silva 2007, Bocco *et al.* 2010a). Una unidad de paisaje delimita espacialmente un complejo o geocomplejo de factores estructurales (biofísicos) que interactúan y evolucionan de manera conjunta y son culturalmente apropiados, lo cual se evidencia en el uso que se les da (Mateo-Rodríguez 1984).

Como casos de estudio que incorporan el análisis paisajístico, se puede citar a García-Romero (1998), quien analiza la estructura y composición físico-geográfica del paisaje para definir el potencial de aprovechamiento de recursos naturales en paisajes volcánicos del centro de México y propone acciones de restauración ambiental y conservación del paisaje. Hernández-Santana *et al.* (2009) evaluaron la compatibilidad entre paisajes agrícolas y el potencial geomorfológico del terreno en planicies de la cuenca del Río Lerma en México. Para el Estado de Puebla, se puede mencionar la regionalización natural de la cuenca del Río Atoyac que hace Mora-Murguía (2005) con base en la conectividad-fragmentación de sus paisajes.

Un aporte importante en los estudios de paisaje lo constituye el concepto de potencial natural, el cual se ha utilizado ampliamente en la tradición geográfica de Europa del este. De acuerdo con Bastian *et al.* (2012) el concepto de potencial natural se refiere a la función del paisaje de proveer de bienes y servicios a la sociedad a partir de sus recursos naturales, independientemente de que estos se utilicen o no y la acepción “natural” refiere a elementos biofísicos y no debe confundirse con “prístino” o “sin perturbación”. Este mismo autor refiere que el concepto fue introducido por Neef en la década de 1960 inicialmente en un contexto económico y en la década siguiente, el geógrafo alemán Haase hace referencia a varios potenciales naturales parciales: potencial biótico, de provisión de agua, para disposición de residuos, de regulación biótica, geoenergético y recreativo. En el contexto de la ecología del paisaje el concepto de potencial fue ampliado por Mannsfeld, Dollinger, Marks, Durwen, entre otros (Bastian *et al.* 2012). El potencial natural del paisaje se ha utilizado en la planificación del territorio en Europa (Haase 1989, Bastian 2000, Bastian *et al.* 2006 y 2012) y Latinoamérica (Luna 1999,

Tonial *et al.* 2005, Ramón *et al.* 2013). En México, se ha utilizado principalmente en la ordenación del territorio (Salinas *et al.* 1999; PLADEVRA 2000, Priego-Santander y Bocco 2015), así como evaluaciones del potencial ganadero (Travieso-Bello *et al.* 2013) y potencial ecoturístico (Acosta-Villegas 2008, Acosta-Villegas y Priego-Santander 2010, Flores-Domínguez y Priego-Santander 2011).

CAPÍTULO 2. ENFOQUE TEÓRICO-CONCEPTUAL.

2.1 GEOECOLOGÍA DEL PAISAJE

A partir de la década de los 70's del siglo pasado, se dio una revaloración de la noción de paisaje como concepto integral de análisis para entender las relaciones sociedad-naturaleza, en un contexto de preocupación internacional por el deterioro ambiental y la necesidad de tener marcos teóricos y metodológicos que dieran respuestas a esta problemática (Urquijo y Bocco 2010).

Dentro de la geografía y otras disciplinas, los estudios de paisaje tradicionalmente se han abordado desde marcos teóricos que privilegian los análisis biofísicos, así como aquellos que tienen un marcado sesgo cultural y en menor medida trabajos que buscan equilibrar ambas posturas. Estas divergencias obedecen a las diferentes tradiciones geográficas que tienen como objeto de estudio al paisaje.

En el caso de la presente investigación, la noción de paisaje utilizada proviene de la llamada ciencia del paisaje, la cual se desprende de la geografía física desde hace más de un siglo y se enfoca en analizar las relaciones entre elementos geográficos del paisaje que tienen un origen natural (Ostaszewska 2004). Actualmente, los trabajos científicos desarrollados en el seno de esta disciplina, se enfocan a evaluar y proponer acciones de planeación, gestión y manejo de los recursos naturales de un territorio.

Particularmente, en la geografía rusa, el enfoque de paisaje se desarrolló desde finales del siglo XIX y principios del XX orientando los trabajos principalmente al entendimiento de los procesos naturales que articulan vertical y horizontalmente la conformación de las esferas de la tierra y los procesos y funciones involucradas en su manifestación física. Su base teórica proviene del trabajo de geógrafos, geólogos y edafólogos europeos entre los cuales se puede mencionar las observaciones de Humboldt sobre las relaciones entre la zonalidad latitudinal y altitudinal de plantas y animales en relación con el clima en varias partes del mundo. En Rusia, el énfasis inicial se puso en el conocimiento de los componentes físico-geográficos del paisaje, como el relieve, la

geología y los suelos. De acuerdo a Bailey (2009), las observaciones del científico Dokuchaev en 1879, en suelos Chernozem de la estepa Rusa fueron se consideran como precursores del enfoque científico que en la geografía Rusa se le dio a la noción de paisaje. Dokuchaev consideró al suelo como una entidad independiente con propiedades minerales y orgánicas, formado por el efecto combinado de animales, plantas, la roca madre, el clima y el relieve que van siendo modificados en el tiempo y sus observaciones introdujeron a más científicos al estudio de las interacciones entre los componentes bióticos y abióticos del ambiente, entre ellos Sibirtsev y Glinka quienes continuaron analizando las relaciones entre el suelo y sus factores de formación. A su vez Polynov (1935, 1937 citado por Huggett 1995) se enfocó al estudio de los flujos de materia a través de los paisajes, tomando como base la migración de elementos químicos presentes en las rocas.

La principal fortaleza del análisis físico-geográfico del paisaje es que integra los resultados de disciplinas individuales como la geomorfología, climatología, hidrología, geografía del suelo, geografía de las plantas, entre otras y es por esta razón que se ha aproximado a la Ecología, en la disciplina denominada ecología del paisaje o geoecología (Ostaszewska 2004). La diferencia entre Ecología del paisaje y Geoecología se debe al enfoque biocéntrico de la primera, desarrollado principalmente por la escuela Anglosajona, mientras que el segundo privilegia el enfoque geográfico, desarrollado principalmente por las escuelas Europeas del paisaje (Bastian 2001, Antrop 2004).

Este enfoque científico integrador, parte de la cartografía de unidades espaciales o de paisajes, las cuales tienen la particularidad de poseer homogeneidad estructural y funcional al interior que las diferencia de otras unidades pero permanece en estrecha relación entre sí. Su integración comprende factores geográficos relativamente más estables como el clima, la roca madre y sus geoformas, así como los componentes menos estables como los suelos, la vegetación y fauna caracterizados por una mayor dinámica espacial y temporal (Piego-Santander *et al.* 2010). La mayoría de los expertos reconocen que el relieve debe ser la base de cualquier clasificación integral de unidades de paisaje; por esto, en gran parte de las escuelas de paisaje se parte de una base geomorfológica a la

cual se le adiciona el análisis de la litología y el suelo, los cuales forman la parte física del paisaje; y se complementa la integración de las unidades con los componentes bioclimáticos y de uso del suelo caracterizados por un gran dinamismo a varias escalas temporales (Bocco *et al.* 2010a). Además, cada unidad debe tener una representación multiescalar por lo que el enfoque jerárquico utilizado para su delimitación debe permitir moverse de lo general a lo particular (Bocco *et al.* 1999).

Cabe mencionar que el enfoque científico del paisaje ha sido ampliamente cuestionado por geógrafos de otras tradiciones geográficas, bajo los argumentos de que posee un marcado determinismo geográfico (Frolova 2001, 2006), con una dominancia de los componentes físicos geográficos del paisaje sobre otros como los sociales o culturales (Bocco *et al.* 2010a); además de que se centra más en el método de investigación y deja de lado la reflexión filosófica (Ostaszewska 2004).

La posibilidad de implementar este enfoque en trabajos geográficos en Latinoamérica se debe al geógrafo de origen cubano Manuel Mateo, cuya principal contribución es la traducción y la adaptación de las bases teóricas y conceptuales de la escuela Rusa al contexto Latinoamericano (Mateo-Rodríguez 1984). Como ejemplos de trabajos en donde se utiliza este enfoque para el análisis y solución de problemas relacionados con el manejo del territorio, se puede mencionar a: Priego-Santander *et al.* (2003, 2004, 2005, 2010, 2013), Acosta-Villegas (2008), Mathews-Fernández (2008), Acosta-Villegas y Priego-Santander (2010), Campos-Hernández (2010), Sánchez-Noriega (2011), Flores-Domínguez y Priego-Santander (2011), Espinoza (2013), Ramírez-Sánchez (2013), Velazco (2014), Priego-Santander *et al.* (2013), Flores-Domínguez *et al.* (2014a y b) entre otros.

Existen además otros enfoques teóricos-conceptuales geográficos para la delimitación de paisajes, que toman como base las particularidades de su escuela geográfica de origen. En el cuadro 1 se muestra una breve síntesis de las diferentes variantes del concepto de paisaje. Si se desea abundar en las diferencias escuelas de paisaje dentro de la geografía, se puede consultar a Bocco *et al.* (2010a).

Cuadro 1. Variantes del enfoque de paisaje. Fuente: Molano-Barrero 2004.

Campo	Término	País	Características	Concepto	Definición
Geográfico	Landscape	Inglaterra	Comprende elementos fácilmente perceptibles. Es lo visible del paisaje.	Fenosistema	Conjunto de componentes perceptibles en forma de panorama, escena o paisaje. Estos se perciben en forma sensorial, intuitiva, global.
	Landschaft	Alemania			
	Landskip	Holanda			
Ecogeográfico	Geosistema	URSS	Incluye componentes de observación no inmediata; nociones abstractas.	Criptosistema	Conjunto de abstracciones logradas mediante análisis lógico cuantitativo del paisaje real. Enfoque teórico.
	Ecosistema	Inglaterra			

2.2 DESARROLLO SUSTENTABLE.

Posterior a la revolución industrial, el medio biofísico se utilizó como proveedor ilimitado de recursos materiales y energéticos, que mediante transformaciones y manejos tecnológicos, fueran más accesibles para su consumo por la sociedad. Sin embargo, derivado de la crisis ambiental mundial y de la preocupación social por el agotamiento o deterioro de los recursos naturales, desde finales del siglo XX y principios del XXI, el concepto de desarrollo sustentable se encuentra presente en los discursos del sector académico, político y empresarial, como un enfoque alternativo para mejorar la situación medioambiental mundial (Durán 2012).

De acuerdo a su definición más difundida, el desarrollo sustentable es aquel que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (WCDE 1987). Si bien en el concepto está presente el tema ambiental, algunos autores consideran que no se cuestiona el propio modelo económico capitalista de desarrollo, el cual se basa en la búsqueda de plusvalía y en anteponer el interés privado sobre el colectivo (Valdés 2004) y en vez de eso se proponen conceptos como la economía verde enfocada a una mayor

acumulación de ganancias económicas mediante inversiones verdes en sectores estratégicos como las energías renovables (Lander 2011).

El discurso del Desarrollo Sustentable está diferenciado por los intereses frente al medio ambiente que tienen los diversos actores sociales, políticos, académicos, etcétera, lo que da lugar a divergencias en las opciones para incorporar la sustentabilidad al proceso de desarrollo (Mateo-Rodríguez 2012). En este sentido, se reconocen al menos cuatro dimensiones de la sustentabilidad (Durán 2012):

- La sustentabilidad ecológica/ambiental enfocada al desarrollo compatible con el mantenimiento de los procesos ecológicos-ambientales, la diversidad biológica y la base de los recursos naturales.
- La sustentabilidad social, en donde el desarrollo debe fortalecer la identidad de las comunidades, lograr el equilibrio demográfico y la erradicación de la pobreza.
- La sustentabilidad económica, que requiere un desarrollo económico eficiente y equitativo para las generaciones actuales y futuras.
- La sustentabilidad geográfica, que reconoce que el desarrollo debe corresponder con la realidad de los territorios y atenuar disparidades y disfuncionalidades, además de promover sus potencialidades y limitar sus vulnerabilidades.

No obstante las diferentes dimensiones de la sustentabilidad, la dimensión ambiental se debe considerar como eje fundamental en el proceso de lograr el desarrollo sustentable, lo cual implica que el ambiente es un factor estratégico que provee los recursos y servicios para satisfacer las necesidades humanas (Mateo-Rodríguez 2012). Por esta razón, una investigación geográfica de corte ambiental puede servir a la construcción de un cuerpo de conceptos y metodologías de utilidad para la valoración práctica del desarrollo sustentable.

2.3 SUSTENTABILIDAD GEOECOLÓGICA DEL PAISAJE.

Los paisajes geográficos y su análisis estructural, funcional y evolutivo, son el objeto de estudio de las investigaciones geoecológicas, en las que invariablemente, el componente humano como elemento de transformación del paisaje, debe estar presente. Desde la perspectiva geoecológica, un paisaje sustentable se considera como el espacio geográfico donde las comunidades humanas, el uso de recursos y la capacidad de carga, se pueden mantener permanentemente (Mateo-Rodríguez y Da Silva 2007).

La sustentabilidad ambiental o geoecológica de los paisajes, se refiere a la capacidad del paisaje para mantener un funcionamiento adecuado que garantice su estabilidad ambiental, así como la satisfacción de metas sociales, de acuerdo su potencial de uso. Dentro del contexto del análisis sistémico, Mateo-Rodríguez (2012) propone analizar la estructura, el funcionamiento, la modificación y transformación humana de los paisajes, mediante indicadores que permitan valorar la estabilidad ambiental del paisaje e identificar aquellos factores causantes de su degradación. En términos prácticos, cualquier uso que se haga o pretenda hacer del paisaje, debe incluir el reconocimiento de aquellos elementos y procesos del paisaje que le confieren mayor estabilidad para su funcionamiento, así como la valoración de fuentes de degradación que disminuyen la capacidad del paisaje para autorregularse ante factores de perturbación. De manera similar, Gallopín (2010) hace referencia al enfoque sistémico-ecológico del desarrollo sustentable, en el cual se busca tener un mayor control de los efectos humanos directos e indirectos sobre los ecosistemas, el equilibrio entre los insumos y productos materiales de los sistemas humanos y la minimización de los factores de perturbación de los ecosistemas, tanto locales como globales.

Se entiende que el análisis de la sustentabilidad ambiental del paisaje, requiere conocer previamente el Estado Geoecológico o Ambiental del Paisaje, el cual evidencia el nivel de funcionamiento de los componentes geoecológicos del paisaje (estabilidad funcional), así como la ocurrencia y el grado de afectación de problemas ambientales (Mateo-Rodríguez 2012).

Los problemas ambientales pueden ocurrir por desajustes entre la oferta de los recursos y servicios del medio biofísico y las demandas sociales dentro de marcos sociopolíticos complejos. Como problema ambiental se entiende la combinación de los diferentes objetos de la racionalidad ambiental, que se manifiestan en los procesos que desarticulan la estructura y el funcionamiento del ambiente, teniendo como consecuencia, el dificultar el cumplimiento de las funciones socio-económicas (Ainstein *et al.* 2003). Una posibilidad de reconocer y cuantificar la dimensión del problema, se da a través de atributos ambientales que evidencian el tipo particular de degradación ambiental y su grado de afectación. En este sentido, la degradación geoecológica se define como la pérdida de atributos y propiedades sistémicas por cuestiones antrópicas, que deben garantizar el cumplimiento de las funciones geoecológicas y la actividad de los mecanismos de autorregulación (Mateo-Rodríguez y Da Silva 2007). Como atributos de problemas ambientales se pueden considerar la pérdida de biodiversidad y del hábitat, degradación de la cobertura vegetal del suelo, degradación del suelo (pérdida del horizonte húmico, compactación, salinización), reducción del nivel de agua subterránea, inundaciones, contaminación (del suelo, del agua y atmosférica), alteración de los recursos hídricos, pérdida de la calidad visual de los paisajes, entre otras.

Por Estado Geoecológico o Ambiental se considera, la situación o estatus que el paisaje posee, dada la intensidad de su uso que provoca modificaciones antropogénicas y que ponen en riesgo la capacidad de mantener su funcionamiento. De acuerdo a Mateo-Rodríguez (2012), se reconocen varios niveles del Estado Ambiental los cuales se definen a continuación:

Paisajes altamente estables: Se conserva la estructura original, sin problemas de deterioro ambiental significativos. La influencia antropogénica en la transformación del paisaje es de moderada intensidad. Estos paisajes, constituyen los núcleos de alta estabilidad, en donde se combina un alto grado de conservación de la naturalidad y el uso compatible de los recursos.

Paisajes medianamente estables. Reflejan pocos cambios en la estructura. Inciden algunos problemas de intensidad leve a moderada, que no alteran el potencial natural y la integridad del paisaje. El uso del territorio es acorde con el potencial y puede ser sustentado, por varias generaciones. Estos espacios requieren el mantenimiento de su funcionalidad mediante actividades de cuidado y prevención de daños con relativo bajo costo económico.

Paisajes escasamente estables: Se caracterizan por fuertes cambios en su estructura y funcionamiento, de tal manera que el cumplimiento de las funciones geoecológicas es limitado, aunque aún conservan la integridad. La incidencia de problemas ambientales por sobreexplotación de los recursos, resulta en descenso significativo de la productividad, la cual muy posiblemente se perderá en el curso de una generación.

Paisajes inestables: Pérdida casi total de su estructura y funcionamiento, con eliminación paulatina de las funciones geoecológicas. Son comunes los problemas ambientales de fuerte intensidad. Generalmente, el uso de la tierra y el impacto humano han excedido la capacidad de carga y soporte del paisaje, lo que reduce drásticamente sus funciones potenciales. Requieren la implementación de acciones de mitigación de daños y protección ambiental para recuperar el potencial natural.

Paisajes altamente inestables: Consiste en la pérdida y alteración generalizada de la estructura espacial y funcional del paisaje. Los problemas ambientales son de intensidad muy fuerte. El potencial inicial de recursos ha sido completamente destruido y su uso para habitación humana no es recomendado. La población generalmente necesita ser reubicada lo que implica al mismo tiempo enormes costos.

CAPÍTULO 3. ENFOQUE METODOLÓGICO

El universo de recursos físicos y bióticos que se manifiestan en un territorio se encuentran en una estrecha interrelación, de manera que al modificar el patrón de distribución de alguno se afectan todos los demás. Esta propiedad permite el estudio de sus componentes a partir de modelos sistémicos de carácter dinámico, espacialmente determinados y con una estructura de organización jerárquica, de modo que los cambios en un nivel de organización afectarán a los demás niveles (Bailey 2009).

La problemática ambiental de degradación de los recursos naturales ha pasado a ser un tema de interés global desde hace algunos años, razón por la cual organizaciones internacionales como la ONU y otras más han coordinado diversas propuestas para lograr hacer un aprovechamiento más racional de los recursos. En el marco de la ciencia geográfica es posible ayudar a resolver estos retos y es entonces que el enfoque paisajístico, cobra relevancia en la aproximación al conocimiento y manejo de los recursos naturales al ofrecer herramientas de análisis del terreno con amplias aplicaciones en materia de ordenamientos ecológicos, zonificaciones y regionalizaciones ecosistémicas, análisis espaciales de biodiversidad, de fragilidad ecológica, de evaluación ambiental, entre otras. El estudio del paisaje se caracteriza por un análisis integral del terreno y permite la definición y clasificación jerárquica de unidades de paisaje. Particularmente el enfoque físico-geográfico complejo, se ha utilizado en la caracterización de los recursos naturales y delimitación de unidades funcionales, ya que permite tener una clasificación coherente de la superficie terrestre, integrando todos los componentes naturales en una perspectiva holística, que facilita esclarecer las propiedades inherentes al ecosistema o geosistema como un todo.

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL ESTADO DE PUEBLA

3.1.1 Contexto geográfico

El Estado de Puebla se ubica entre los 17° 52 y 20° 50' de latitud norte y entre los 96° 43' y 99° 4' de longitud oeste (figura 1). Según datos oficiales, la población en el año 2010 era de 5 800 000 habitantes y la entidad tiene una superficie de 34289.66 km². En relación al sector agropecuario, la superficie agrícola es de ~15 mil km², de los cuales ~12700 km² se cultivan en temporal (85% del total agrícola). Además ~3500 km² son de pastizales y ~12 mil km² son de bosque y selva en diversas etapas sucesionales (INEGI 2013a).

La mayor parte del territorio se encuentra dentro de la Provincia Faja Volcánica Transmexicana (FVT). El clima va del frío de las altas montañas al cálido semidesierto de la región Mixteca. Posee numerosas formas de relieve entre las que se encuentran las sierras montañosas al norte y sur del Estado y amplios valles y planicies de gran importancia agrícola en la parte central. Casi 90% del territorio pertenece a la cuenca del Balsas que desemboca en el océano pacífico; el territorio restante se comparte con otras tres cuencas que desembocan al Golfo (Tuxpan-Nautla, Papaloapan y Pánuco). Aproximadamente 40% del territorio posee clima templado-subhúmedo y en otro 38% el clima es del tipo cálido y semicálido, los climas frío y semifrío se restringen a las montañas volcánicas altas.

La geología es variada y bastante compleja, especialmente en el sur, donde hay terrenos metamórficos del Precámbrico, Paleozoico y Mesozoico, que se hallan yuxtapuestos y limitados por grandes zonas de falla. Las rocas que los forman han sido afectadas por varias fases de metamorfismo y deformación a lo largo del tiempo geológico. El más difundido de estos terrenos, es el Complejo Acatlán que aflora ampliamente en toda el área de la Mixteca Poblana. Sobre este basamento metamórfico, descansa una potente secuencia sedimentaria marina detrítica y carbonatada de edad mesozoica, que atestiguan la invasión oceánica en varios sectores de la entidad, la cual se extendió a gran parte del país; a finales de esta era y durante los inicios de la era cenozoica, las rocas sedimentarias formadas en los fondos marinos, fueron elevadas,

plegadas y fracturadas. Después de la etapa compresiva, se produce la emisión de materiales volcánicos a través de las fracturas corticales. El más reciente de este volcanismo, está representado por enormes volúmenes de lavas y piroclastos de composición basáltico-andesítica, que constituyen la FVT. La erosión de las rocas expuestas ha dado origen a la formación de toda una serie de depósitos continentales; tanto clásticos, como carbonatados y evaporíticos (INEGI 2000). Los suelos del Estado comprenden Leptosoles, Regosoles, Vertisoles, Phaeozems, Luvisoles y Andosoles principalmente y en menor cantidad Cambisoles, Calcisoles, Xerosoles, Chernozens y Solonchaks (INEGI 2007).

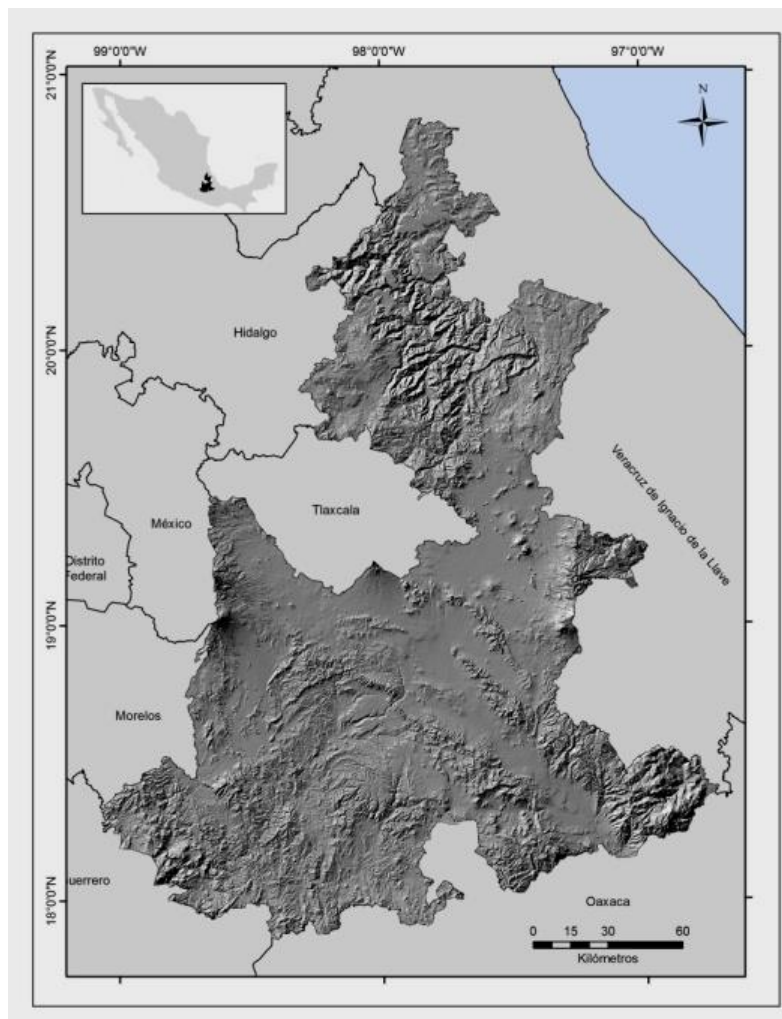


Figura 1. Ubicación geográfica del Estado de Puebla, México. Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2014a)

3.1.2 Contexto de la agricultura en Puebla

La superficie agrícola nacional es de 322 mil km² aproximadamente, que representa 16% del total del país. La superficie que se siembra anualmente es de 221 mil km², de las cuales 159 mil dependen del temporal de lluvias y 62 mil son de riego. La zona de riego más importante se encuentra en el noroeste del país, en los Estados de Sinaloa, Chihuahua y Sonora principalmente (10900, 9700 y 9600 km² respectivamente), mientras que en el sur y sureste, la disponibilidad de tierras de riego es menor.

En México, la agricultura de temporal es la actividad económica y cultural con mayor superficie, siendo el Estado de Veracruz el principal a nivel nacional (21000 km² con agricultura de temporal), no obstante su posición geográfica permite que haya lluvias gran parte del año. Le siguen en importancia por superficie los Estados de Jalisco, Zacatecas, Oaxaca, Tamaulipas y Puebla (16400, 15100, 13100, 13000 y 12700 km² respectivamente) en donde las condiciones climáticas no son tan favorables para la agricultura de temporal, exceptuando Tamaulipas (INEGI 2010a).

La superficie de temporal integra las tierras sembradas anualmente (97500 km²) así como las que mantienen cultivos por más de un año (61500 km²). La mayor superficie de tierras sembradas anualmente en temporal se encuentra en los Estados de Zacatecas, Puebla, Jalisco y Chiapas y (9320, 9000, 7878 y 7044 km² respectivamente) (SAGARPA 2014). Con base en estas cifras, el Estado de Puebla se destaca como uno de los Estados en México con mayor importancia para la agricultura de temporal con cultivos que se siembran anualmente. En Puebla, esta superficie duplica la cantidad de tierras que se destinan a cultivos perennes, lo cual evidencia su importancia como fuente de ingresos económicos para un gran sector de población campesina.

La alta dependencia de las lluvias, ubica a los campesinos de temporal en condiciones de vulnerabilidad ante eventos climáticos extremos que dañen los cultivos. En relación a los últimos diez años, la ocurrencia de pérdidas de cultivos en Puebla solo han afectado como máximo a 20% de las tierras en 2011 (SAGARPA 2014). No obstante, casi 80%

de los agricultores del Estado, dependen de sus cosechas como fuente principal de alimentos e ingresos económicos (Vega 2014).

El principal cultivo de Puebla es el maíz ya que se siembra en tres cuartas partes de la superficie de temporal, sin embargo su rendimiento promedio de grano es de los más bajos del país (1 Ton/Ha contra 1.7 Ton/Ha en el país), mientras que en los Estados de Jalisco, Nayarit y Colima, el rendimiento promedio es de 4.7, 3.8 y 3.7 Ton/Ha respectivamente (SAGARPA 2014). Además de maíz, en Puebla se cultiva café, frijol, cebada, naranja, sorgo, haba y manzana, los cuales junto con el maíz abarcan más de 90% de las tierras agrícolas de temporal (Cuadro 2) (SAGARPA 2014). Sin embargo la importancia del maíz incluye aspectos culturales y de biodiversidad, ya que Puebla está considerado como centro de origen y diversificación de maíz y en donde se cultivan gran variedad de razas nativas que se han adaptado a las condiciones del lugar a través de los años. La domesticación del maíz comenzó posiblemente hace 9 mil años en la región de Tehuacán (Kato *et al.* 2009).

Cuadro 2. Principales cultivos en Puebla y su superficie abarcada. Fuente: SAGARPA (2014)

Cultivo	Superficie	
	Km ²	%
Maíz grano	5,037	63
Café cereza	722	9
Frijol	589	7
Cebada grano	293	4
Naranja	232	3
Sorgo grano	204	3
Haba grano	168	2
Manzana	88	1
Otros	707	9
Total	8,041	100

En las últimas décadas, las políticas en México han estado orientadas a la modernización y tecnificación del campo, a la producción de cultivos con alto valor económico, así como al reemplazo de variedades nativas de maíz por semillas híbridas

altamente productivas, con lo que la agricultura campesina se ve amenazada (González-Navarro 1987, Ortoll 2003, Otero 2004).

Respecto al nivel socioeconómico de la población, en Puebla habitan casi 6 millones de personas (INEGI 2010a), de los cuales cerca de 3.5 millones viven en pobreza. Esta cantidad representa más de 60% de la población, ubicando al Estado en el quinto lugar nacional con más habitantes viviendo por debajo de la línea de pobreza extrema, así como una alta proporción poblacional sobrevive con ingresos económicos por debajo del nivel mínimo de bienestar para tener una vida digna (CONEVAL 2012). No se tiene la cifra exacta de que fracción de la población pobre se dedica a la agricultura, pero de acuerdo a INEGI (2010a), la proporción de población ocupada en el sector primario es de 22%, es decir 1 millón 300 mil personas. A este total hay que agregarle el número de personas dependientes económicos de estos productores.

En términos de unidades de producción rural, en Puebla existen cerca de 380 mil, siendo la tercera entidad con mayor número. De este total, 98% no disponen de créditos ni seguro agropecuario contra desastres naturales, sin embargo se estima que anualmente 80% de las unidades son afectadas por contingencias climáticas (INEGI 2010a).

Las políticas de desarrollo agropecuario se han enfocado preferentemente a elevar la competitividad agrícola mediante el fomento de agronegocios que incorporen innovaciones tecnológicas para la producción, transformación y comercio. La política denominada Agricultura por Contrato, consiste en establecer contratos de compra venta de la cosecha de un ciclo agrícola, entre empresas privadas y productores. En este convenio el gobierno funge como garantía de productores y subsidia insumos y asistencia técnica a los productores, que aseguren buenas cosechas. Sin embargo, en Puebla los cultivos favorecidos han sido los de interés agroindustrial, como la caña de azúcar (INEGI 2010a).

3.1.3 Contexto ambiental

La sustentabilidad del paisaje en Puebla se ve amenazada por la degradación acelerada de sus recursos naturales, los cuales se encuentran inmersos en la gran complejidad físico-geográfica del territorio (INEGI 2000, Flores-Domínguez et al. 2014a y b), así como un mosaico de regiones socio-culturales altamente diverso (CONABIO 2011). Sin embargo, se ha documentado que los efectos de la degradación ambiental afectan mayormente a los habitantes más pobres de los espacios rurales, debido a limitaciones en el acceso a tierras de buena calidad, a tecnologías de producción, insuficiencia de créditos, financiamiento y asistencia técnica (Ramírez-Juárez 2003) que les permitan hacer frente a su realidad ambiental.

Si bien en el Estado se ha evaluado la capacidad agrícola de la tierra y la degradación del suelo (por prácticas agrícolas en áreas poco aptas) (Ruíz-Careaga *et al.* 2004 y 2005, Mora-Munguía 2005, Alvarado-Carmona *et al.* 2006, Santacruz 2014), ésta se ha concentrado en regiones como la Sierra Norte y la Sierra Mixteca al sur. En este trabajo se presenta una evaluación a escala estatal del potencial natural del paisaje para la agricultura, así como la determinación del nivel de compatibilidad entre el uso agrícola potencial y actual. Dado que se ha mencionado la importancia de la agricultura de temporal por la superficie ocupada, el análisis se centra en este tipo de agricultura, excluyendo los paisajes donde la agricultura es principalmente de riego.

3.2 DISEÑO METODOLÓGICO

El proceso metodológico consistió de varias fases: (1) Delimitación cartográfica de unidades de paisaje, las cuales constituyen la unidad de análisis en esta investigación, (2) cálculo del potencial natural agrícola de los paisajes, (3) análisis de la Compatibilidad Agrícola del Paisaje, (4) determinación del Estado Ambiental de los Paisajes con base en su Geodiversidad, Singularidad, Biodiversidad y nivel de Degradación Ambiental y 5) evaluación de la Sustentabilidad Ambiental a partir de la Integración del Estado Ambiental y el Potencial Agrícola.

3.2.1 Delimitación de unidades de paisaje a escala 1:250,000.

Se utilizó la siguiente información cartográfica: cartas digitales 1:250 000 de geología (serie I, INEGI 1998), edafología (serie II, INEGI 2007), vegetación-uso del suelo (serie V, INEGI 2013a), así como la carta climática digital 1:1 000 000 (García 1998). Además se construyó un mapa de la disección vertical del terreno (Spiridonov 1975) y un modelo de inclinación del terreno a partir del modelo digital de elevación (MDE) con 30m de resolución espacial obtenido de AsterGDEM (METI-NASA 2012).

La disección vertical (DV) es una clasificación morfométrica del relieve que representa la diferencia en metros entre el punto de más elevación y el de menor dentro de un área de 1 km². El procedimiento detallado para construir el mapa de DV se puede consultar en Priego-Santander *et al.* (2010). El mapa de DV se utilizó como insumo para construir un mapa geomorfológico, para lo cual se formaron intervalos con los valores de DV para formar las categorías: planicies (DV menor a 40m/km²), lomeríos (DV entre 40 a 100m/km²) y montañas (DV mayor a 100m/km²). El mapa geomorfológico se complementó integrando las geoformas de piedemontes y valles fluviales, las cuales no se diferencian morfométricamente y su delimitación se hace mediante interpretación de isolíneas altitudinales y la red de escurrimientos superficiales obtenidos del conjunto de

datos vectoriales topográficos 1:50,000 (INEGI 2010b), así como del mapa del relieve de México (IG-INE 2003).

Toda la información cartográfica recabada y generada fue estandarizada en sus límites cartográficos al Marco Geoestadístico Nacional correspondiente al Estado de Puebla (INEGI 2014a). Dado que la cartografía generada corresponde a la escala 1: 250 000, se estableció una superficie de 1 km² como área mínima cartografiable, por lo que polígonos con área menor se integraron al polígono próximo con el que compartieron más perímetro, según lo propuesto por Priego-Santander *et al.* (2010).

El procedimiento metodológico para la construcción de unidades cartográficas de paisaje, se puede consultar de manera detallada en Priego-Santander *et al.* (2010). En la figura 2 se muestra un esquema gráfico del procedimiento. El cuadro 3 muestra la estructura jerárquica de las unidades de paisaje.

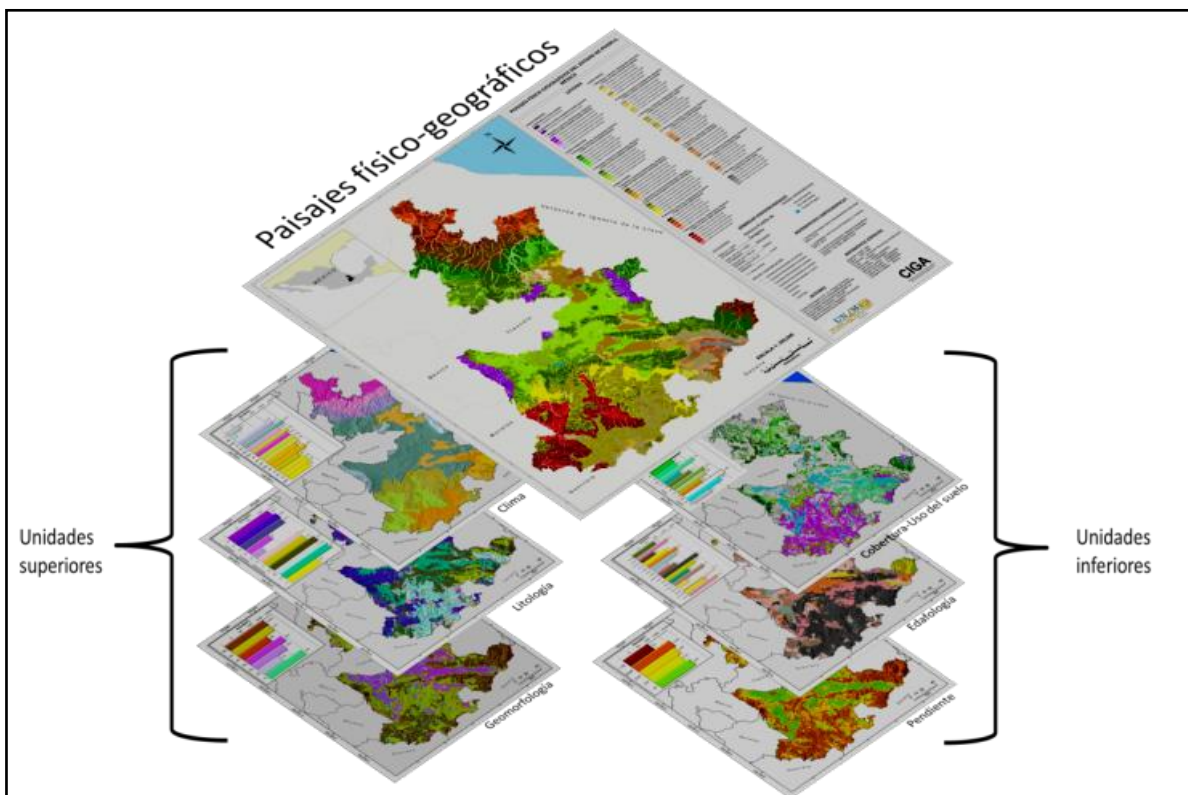


Figura 2. Esquema de integración de información para la construcción del mapa de paisajes. Fuente: elaboración propia.

Cuadro 3. Niveles jerárquicos, definición y criterios de diagnóstico de las unidades de paisaje. Fuente: Priego-Santader *et al.* (2010)

Nivel jerárquico	Definición	Criterios de diagnóstico
Unidad superior	Genéticamente homogénea, está formada por unidades inferiores complejas y simples, que se difunden en un mismo basamento geológico, un determinado complejo de mesoformas de relieve y un mismo clima	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo morfogenético de relieve similar • Homogeneidad litológica o del tipo de depósitos • Grupos de suelos principales similares • Formaciones vegetales o tipos de uso del suelo similares
Unidad inferior compleja	Formadas por un sistema de unidades simples que están genética y dinámicamente interrelacionadas. La unidad compleja se difunde en una mesoforma completa o en parte de la misma, con el predominio de un tipo de roca madre y del mismo complejo edáfico.	<ul style="list-style-type: none"> • Asociación del mismo conjunto morfológico de mesoformas del relieve • Homogeneidad territorial del grado de humedecimiento • Predominio de un mismo agrupamiento de suelos • Conjunto de subformaciones vegetales y/o tipos de usos del suelo similares
Unidad inferior simple	Compuestas por grupos de facies que están muy relacionadas a causa de una situación común en uno de los elementos de una mesoforma del relieve y por medio del escurimiento superficial o subsuperficial. En tales condiciones predominan variedades genéticamente asociadas de suelos y biocenosis.	<ul style="list-style-type: none"> • Igual situación en un elemento de una mesoforma del relieve. • Similitud de la desmembración vertical y horizontal del relieve • Igual inclinación de la pendiente • Similar tipo y subtipo de suelo • Mismo tipo de comunidades vegetales o igual tipo de aprovechamiento del suelo.

3.2.2 Evaluación del potencial natural para la agricultura.

Esta consistió en evaluar inicialmente el potencial agrícola de los componentes relieve, suelo y clima, con base en criterios indicadores del máximo potencial (cuadro 4) para los principales cultivos de temporal en Puebla listados en el cuadro 2. El potencial natural del paisaje de cada cultivo se evaluó integrando los potenciales individuales del relieve, clima y suelo. Finalmente una unidad de paisaje fue considerada con alto potencial natural agrícola cuando tuvo potencial alto para al menos tres cultivos, independientemente de cuáles fueron estos. Además de evaluar el potencial de los ocho cultivos principales, se evaluaron adicionalmente los potenciales para sorgo dulce y café robusta debido a su importancia agroindustrial y la posibilidad de que se expanda su área de cultivo en el futuro.

Los criterios utilizados y las fuentes de información fueron seleccionados de acuerdo con la escala geográfica de las unidades de paisaje (1:250 000). Todos los potenciales se calcularon mediante un análisis de similitud de Gower (Gower 1971), entre los criterios establecidos y las características físico-geográficas de las unidades. El análisis de similitud de Gower permite incluir en la evaluación, tanto indicadores cuantitativos como cualitativos, ya que hace una estandarización de las variables y el valor resultante puede variar entre 0 y 1.44, en donde el cero corresponde a la mayor similitud entre criterios y unidades de paisaje. El índice de Gower se calculó con el programa SIMILITUD (Novúa 2011).

Para su representación cartográfica, los valores de similitud se categorizaron, mediante intervalos con rompimiento natural de Jenks, en las clases Muy alto, Alto, Medio, Bajo y Muy bajo potencial, en donde la categoría “Muy alto” corresponde a la mayor similitud. Las categorías formadas mediante el método de Jenks se caracterizan porque las desviaciones estadísticas al interior de cada categoría son minimizadas, además que su representación cartográfica mostró una mejor diferenciación espacial. Las clases de Jenks se formaron en ArcGis 10.2 (ESRI 2013). El uso de categorías cualitativas permite mayor facilidad en la interpretación del potencial y esto favorece una mejor comunicación de los resultados, los cuales deben trascender el nivel científico-académico hacia otros niveles involucrados en la planificación del paisaje y la toma de decisiones (Neff 1969 citado en Bastian 2012).

Potencial del relieve

Los indicadores del potencial del relieve fueron la disección vertical del terreno (DV, Spiridonov 1975), la densidad del drenaje superficial y la inclinación del terreno (Bocco *et al.* 2010b). Los valores de DV e inclinación se calcularon en ArcGis 10.2 (ESRI 2013), a partir de cotas altitudinales, las cuales se obtuvieron de INEGI (2010b) al igual que la red de drenaje superficial. El máximo potencial del relieve para la agricultura de temporal se estableció como:

DV entre 2.5 a 10 m/km²

Densidad de drenaje entre 0.3 a 1 km/km²

Inclinación del terreno entre 1 a 3 grados

A partir de estos criterios se calculó su similitud de Gower con las características de cada unidad de paisaje.

Potencial climático

Como indicadores de potencial climático se consultó los requerimientos de precipitación acumulada, el rango óptimo de temperatura media anual y el tipo clima, para cada uno de los cultivos evaluados, de acuerdo a la base de datos Ecocrop (FAO 2000). Los datos de temperatura y precipitación para el estado de Puebla se obtuvieron de registros meteorológicos de 121 estaciones meteorológicas y agrometeorológicas en el Estado de Puebla (CNA 2011, FUPPUE 2011, INIFAP 2011). La antigüedad de los registros varió entre 5 y 30 años dependiendo de la estación.

Una unidad de paisaje se consideró con potencial climático a partir de la evaluar la similitud entre sus características climáticas y las requeridas por cada cultivo, de tal manera que entre más similares el potencial fue mayor. Los requerimientos climáticos de cada cultivo se muestran en el cuadro 4b.

Potencial edáfico

El potencial edáfico se definió con base en la interpretación de la fertilidad de los principales grupos de suelos y otros criterios de potencial agrícola consultados en INEGI (2004a), Iuss (2007), Bautista *et al.* (2009) y FAO (2000). Estas interpretaciones se basan en el conocimiento que expertos tienen sobre la capacidad agrícola de los suelos. La evaluación del potencial edáfico se realizó comparando la similitud de los tipos edáficos de cada unidad de paisaje con las evaluaciones expertas consultadas. Los tipos de suelos presentes en las unidades de paisaje se obtuvieron de la cartografía de tipos edáficos

escala 1:250 000 (INEGI 2004a y b). El cuadro 4c contiene los criterios de evaluación del potencial edáfico para cada cultivo.

Cuadro 4a. Criterios del potencial del relieve evaluados para la agricultura y categorías de potencial. Fuente: modificado de Bocco *et al.* 2010b

Potencial	Amplitud del relieve (m/km ²)	Densidad de drenaje (km/km ²)	Pendiente del terreno (grados)	Descripción
Muy alto	2.5 a 10	0.3 a 1	1 a 3	Terrenos sin riesgo de inundación y procesos erosivos. Con posibilidad para usar maquinaria agrícola
Alto	10 a 20	1 a 2	3 a 5	Con limitaciones menores para el uso de maquinaria y se requiere algunas prácticas para conservación del suelo
Medio	< 2.5	< 0.3	< 1	Favorable cuando se encuentra en planicies o lugares altos y es desfavorable para la mayoría de cultivos cuando se encuentra en zonas con inundaciones periódicas. Su uso agrícola está condicionado a lugares con buen drenaje.
Bajo	20 a 60	2 a 3	5 a 10	Marginalmente desfavorable. Los procesos erosivos se pueden incrementar. No adecuado para cultivos anuales; limitaciones grandes para la mecanización, se requieren prácticas de conservación de suelos.
Muy bajo	60 a 100	3 a 4	10 a 15	Desfavorable. Alta probabilidad de procesos erosivos, mecanización no recomendada. Solo aceptable para cultivos perennes. Indispensable el uso de prácticas de conservación de suelos.
Sin potencial	> 100	> 4	> 15	Terrenos para uso forestal

Cuadro 4b. Criterios de potencial climático para diferentes cultivos en temporal. Fuente: Gallegos 1997, FAO 2000. Tipos A: árido, C: cálido, SA: semiárido, SC: semicálido y T: templado; subtipos h: húmedo, sh: subhúmedo, t: templado, sc: semicálido y c: cálido

Cultivo	Temperatura media (°C)	Precipitación anual (mm)	Tipo climático	Descripción
Maíz	18 a 33	600 a 1200	ND	Estos niveles son los óptimos para terrenos con riego y temporal, sin que el cultivo sufra estrés por agua o temperatura. Con cantidades mayores o menores de precipitación o temperatura, el riesgo de daños a los cultivos aumenta.
Café arábica	14 a 28	1400 a 2300	Ch y Csh, SCh y SCsh	
Frijol	16 a 25	500 a 2000	Ch y Csh, SAT, SAsc y SAC, SCh y SCsh, Th y Tsh	
Cebada	15 a 20	500 a 1000	Ch y Csh, At, Asc y Ac, SAT, SAsc y SAC, SCh y SCsh, Th y Tsh	
Naranja	20 a 30	1200 a 2000	Ch y Csh, SAT, SAsc y SAC, SCh y SCsh	
Sorgo	22 a 35	400 a 600	Ch y Csh, SAT, SAsc y SAC, SCh y SCsh	
Haba	18 a 28	650 a 1000	Ch y Csh, SAT, SAsc y SAC, SCh y SCsh, Th y Tsh	
Manzana	14 a 27	700 a 2500	SCh y SCsh, Th y Tsh	
Café robusta	20 a 30	1700 a 3000	Ch y Csh	
Sorgo dulce	27 a 35	500 a 1000	Ch y Csh, At, Asc y Ac, SAT, SAsc y SAC, SCh	

Cuadro 4c. Criterios de potencial edáfico para diferentes cultivos en temporal. Fuente: INEGI (2004a), Iuss (2007), Bautista *et al.* (2009) y FAO (2000)

Cultivo	Fertilidad natural	Profundidad del suelo (cm)	Capacidad de drenaje	Textura del suelo	pH del suelo	Salinidad del suelo (dS/m)
Maíz	alta	50 -150	ND	Variable	5 a 7	<4
Café arábica	alta	> 100	Alta	Media	5.5 a 7	<4
Frijol	media	50 -150	Alta	Franco-Arenosa, Franco-Limosa o Franco Arcillosa	5.5 a 7.5	<4
Cebada	media	> 100	Alta	Media	6.5 a 7.5	<4
Naranja	media	> 100	Alta	Fina a Media	5 a 6	<4
Sorgo	alta	50 -150	Alta	Media a Gruesa	5.5 a 7.5	<4
Haba	alta	50 -150	Alta	Media	6 a 7	<4
Manzana	alta	> 100	Alta	Fina a Media	6 a 7	<4
Café robusta	alta	ND	Alta	Media a Gruesa	5 a 6.3	<4
Sorgo dulce	media	50 -150	Alta	Franco-Arcillosa	6 a 7	<4

Potencial natural para la agricultura de temporal

Se calculó el potencial natural para cada cultivo, considerando una unidad de paisaje con “Muy alto potencial natural” cuando tuvo “Muy alto” o “Alto” potencial del relieve, climático y edáfico en al menos tres cultivos. Cuando la unidad tuvo tres cultivos con potencial “Bajo” o “Muy bajo” se clasificó como “Potencial bajo”. Si la unidad cumplió ambas condiciones se clasificó con el mayor potencial. El resto de las unidades se clasificaron con “Potencial medio”. Para cada categoría de potencial se describió la cantidad de unidades de paisaje, la superficie ocupada y se analizó su distribución espacial.

3.2.3 Compatibilidad agrícola del paisaje

Las unidades de paisaje se clasificaron con base en la superficie agrícola de temporal de cada unidad: A) unidades con uso principalmente agrícola con agricultura de temporal > 60%, B) medianamente agrícolas con superficie agrícola entre 34 y 60% y C) escasamente agrícolas con superficie agrícola < 34%. La superficie agrícola se calculó a partir de la cartografía de uso del suelo y vegetación (INEGI 2013a). El mapa de distribución de los paisajes principalmente, medianamente y escasamente agrícolas se muestra en la figura 3.

La compatibilidad agrícola se evaluó comparando el uso agrícola con el potencial natural agrícola de las unidades. Las unidades con potencial alto y uso predominantemente agrícola se clasificaron como “altamente compatibles”; con alto potencial y uso medianamente agrícola se clasificaron como “medianamente compatibles”; si el potencial fue medio, las unidades principalmente y medianamente agrícolas se clasificaron como “medianamente compatibles” y con potencial bajo se clasificaron como “incompatibles”; las unidades escasamente agrícolas se excluyeron del análisis dado que su uso principal corresponde a otras actividades. Las combinaciones de potencial y uso agrícola se muestran en el cuadro 5. Los resultados se describieron en términos del número de unidades de paisaje en cada categoría de compatibilidad, la superficie ocupada y su patrón de distribución espacial.

Cuadro 5. Valoración de la compatibilidad agrícola del paisaje. Fuente: Elaboración propia

Potencial agrícola	Uso		
	Principalmente agrícola	Medianamente agrícola	Escasamente agrícola
Alto	Altamente compatible	Medianamente compatible	No evaluado
Medio	Medianamente compatible	Medianamente compatible	No evaluado
Bajo	Incompatible	Incompatible	No evaluado

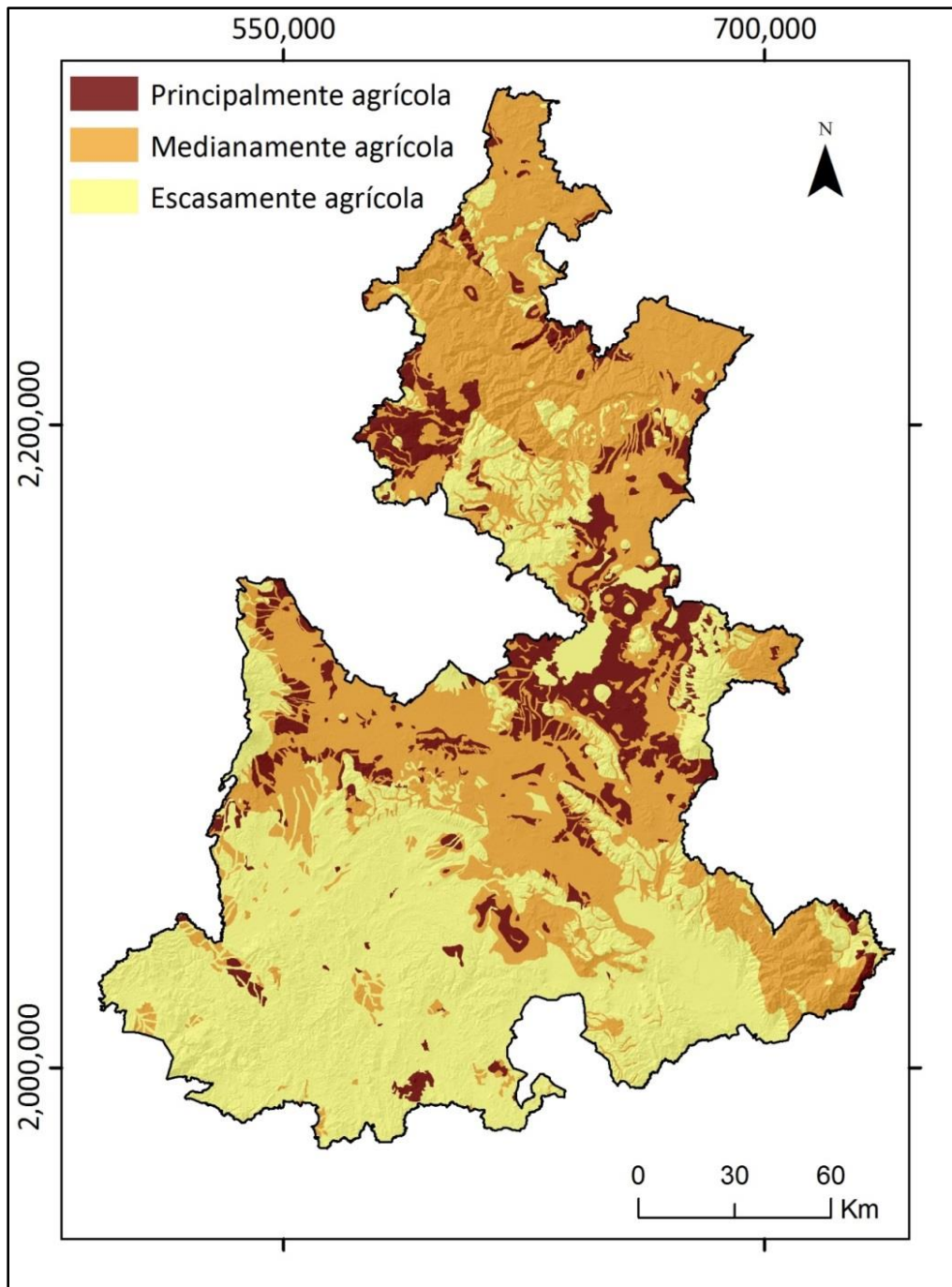


Figura 3. Distribución de los paisajes agrícolas de temporal en el Estado de Puebla. Elaboración propia con base en INEGI (2013a) y Flores-Domínguez *et al.* (2014b).

3.2.4 Estado Ambiental del Paisaje

Como se describió en el apartado teórico-conceptual, la evaluación del Estado Ambiental del Paisaje se determina integrando valoraciones de A) el tipo y grado de impacto antropogénicos que afectan al paisaje y que provocan problemas ambientales como degradación del suelo y la transformación de la cobertura vegetal y B) la capacidad del paisaje para mantener su funcionamiento ante efectos perturbadores, en este caso evaluado en el patrón de biodiversidad y geodiversidad o heterogeneidad geocológica de las unidades como ha sido propuesto por Mateo (2012). En el cuadro 6 se muestran los atributos del Estado Ambiental evaluados en este trabajo, las variables indicadoras de los atributos y la condición de la variable requerida para alcanzar estabilidad ambiental. Una síntesis del procedimiento metodológico para la evaluación de cada atributo se describe a continuación:

Cuadro 6. Enfoque teórico para determinar el Estado Ambiental del Paisaje. Fuente: Elaborado a partir de Mateo 2012.

Atributo		Variable utilizada	Criterio de Estado Ambiental
Problemas ambientales	Degradación del suelo	Índice de degradación del suelo	Muy bajo
	Antropización de la cobertura vegetal del suelo	Índice de antropización de la cobertura vegetal del suelo	Muy bajo
Estabilidad funcional	Geodiversidad	Complejidad corológica	Muy alta
		Complejidad tipológica	Muy alta
		Riqueza de paisajes	Muy alta
		Diversidad de paisajes	Muy alta
	Biodiversidad	Riqueza de fauna silvestre	Muy alta
		Riqueza de flora silvestre	Muy alta
	Fragilidad del paisaje	Singularidad de paisajes	Muy baja
		Presencia de endemismos	Muy baja

Análisis de problemas ambientales

Degradación del suelo. Como indicador de degradación del suelo se utilizó el índice de degradación del suelo (IDS), el cual se construye a partir de valorar cuantitativamente los tipos de erosión dominantes en cada unidad de paisaje y su grado de afectación. La

erosión es el proceso que produce pérdida de la superficie del suelo por la acción del viento y agua y que son acelerados por acción humana. El reconocimiento del agente causal, así como la magnitud del daño y su ubicación geográfica, permitirá el diseño de estrategias de conservación o restauración de las propiedades del suelo. Un paisaje degradado por erosión del suelo repercute en la disminución de la función productiva del suelo, la pérdida de la biodiversidad del lugar, incrementando las afectaciones de eventos extremos como lluvias torrenciales, sequías y desertificación, además que tiene afectaciones sociales al acentuar el grado de pobreza de la población y en muchos casos propicia la migración y abandono del campo. A continuación se detalla brevemente algunas características de los tipos de erosión dominantes en el área de estudio:

Erosión hídrica. Ocurre por lluvias intensas, crecidas de ríos, granizadas, riegos excesivos y en todas las formas en las que el agua es el agente causal de la pérdida de suelo. El suelo es arrastrado principalmente de lugares con cobertura vegetal escasa y donde predominan inclinaciones fuertes del terreno, además algunos tipos de suelos como los Leptosoles son más susceptibles a la erosión.

Erosión eólica. El agente causal es el viento y se ve favorecida cuando la remoción de suelo por labores agrícolas es muy intensa. En relación a la erosión hídrica, el viento es un agente erosivo menos intenso, sin embargo en zonas con clima seco provoca alta degradación del suelo.

Erosión antrópica. Ocurre por efecto directo del hombre al modificar o transformar el paisaje natural de manera abrupta e irreversible. Se considera este tipo de erosión a la presencia de carreteras, presas, asentamientos humanos, bancos de extracción de materiales, líneas de transmisión, gasoductos, etcétera (INEGI 2014b).

La superficie ocupada por cada tipo de erosión al interior de las unidades de paisajes se obtuvo por superposición entre el mapa de unidades de paisaje y la cartografía de erosión del suelo (INEGI 2013b). Se asignó un valor de ponderación a cada tipo y grado de erosión (cuadro 7) de acuerdo al potencial de degradación ambiental descrito en INEGI (2014b).

Cuadro 7. Valor de ponderación para diferentes tipos e intensidades de erosión del suelo. Fuente: Elaboración propia a partir de INEGI (2013b)

Tipo de erosión	Intensidad	Ponderación
Sin erosión evidente		0.01
Eólica, Hídrica	Leve	0.25
	Moderado	0.5
	Fuerte	0.75
	Extremo	0.99
Antrópica (Asentamientos humano, transformaciones en el paisaje)		0.99

El IDS se construye cuantificando el área ocupada por cada tipo y grado de erosión normalizada por su valor de ponderación al interior de cada unidad de paisaje. El índice varía entre 0 y 1, en donde el 0 corresponde a la menor degradación. La ecuación utilizada para el cálculo del IDS es la siguiente:

$$IDS_j = \sum s_i * A_{ij} / A_{tj}$$

Donde:

IDS_j: Índice de degradación del suelo en la unidad de paisaje “j”

s_i: Valor de ponderación del tipo y grado de erosión del suelo “i”

A_{ij}: Área (km²) que ocupa el tipo y grado de erosión del suelo “i” en la unidad de paisaje “j”

A_{tj}: Área (km²) de la unidad de paisaje “j”

Con base en los valores mayor y menor del IDS obtenidos en las unidades de paisaje, se construyeron cinco clases de degradación del suelo: muy alta, alta, media, baja y muy baja. Las clases se formaron tomando intervalos construidos por rompimiento natural de Jenks en ArcGis 10.2 (ESRI 2013).

Antropización de la cobertura vegetal del suelo. Es la alteración del paisaje que evidencia su estado de conservación o perturbación exhibido en el grado de transformación o reemplazo de la cobertura vegetal natural del suelo. En esta investigación se utilizó el índice de antropización de la cubierta del suelo (IACV, Shishenko 1988, modificado por Priego-Santander *et al.* 2005) para cuantificar el grado de modificación antropogénica de

la cobertura vegetal en cada unidad de paisaje. De acuerdo a este índice, el área de cada tipo de cobertura vegetal en la unidad se pondera con un valor que varía entre 0.01 y 0.99 de acuerdo a su grado de naturalidad y se normaliza respecto al área total de la unidad. Los valores de ponderación para las clases de cobertura vegetal se muestran en el cuadro 8. Este índice se ha empleado en la evaluación de la degradación de paisajes de la cuenca Lerma-Chapala (Priego-Santander *et al.* 2005), así como en las regiones de Michoacán: Sierra-Costa (Mathews-Fernández 2008), Meseta Purépecha (Espinoza 2013) y a nivel estatal (Velazco 2014). La ecuación para el cálculo del IACV es la siguiente:

$$IACV_j = \sum r_i * A_{ij} / A_{tj}$$

Donde:

IACV_j = Índice de antropización de la cobertura vegetal del suelo de la unidad “j”

r_i = Valor de ponderación de la cobertura vegetal “i”

A_{ij} = Área (km²) de la cobertura vegetal “i” en la unidad “j”

A_{tj} = Área total (km²) de la unidad “j”

Con base en los valores mayor y menor del IACV obtenidos en las unidades de paisaje, se construyeron cinco clases de antropización de la cobertura vegetal del suelo: muy alta, alta, media, baja y muy baja. Las clases se formaron tomando intervalos contruidos por rompimiento natural de Jenks en ArcGis 10.2 (ESRI 2013).

Cuadro 8. Clases de cobertura vegetal del suelo y valores de ponderación de acuerdo al grado de transformación antrópica que presentan. Fuente: Elaboración propia con base en Priego-Santander *et al.* (2005) e INEGI (2013a)

Cobertura vegetal o uso del suelo	Estado sucesional	Ponderacion (ri)
Bosque, Selva, Pradera	Primaria	0.01
	Secundaria arbórea	0.01
	Secundaria arbustiva	0.3
	Secundaria herbácea	0.5
Matorral, Chaparral	Primaria	0.01
	Secundaria arbustiva	0.3
Bosque cultivado, Palmar inducido		0.3
Pastizal inducido		0.4
Pastizal cultivado		0.5
Agricultura de temporal y Agricultura de riego permanente		0.5
Agricultura de temporal anual		0.6
Agricultura de riego anual		0.75
Asentamientos humanos		0.99

Evaluación de la estabilidad funcional del paisaje

Como atributos de la estabilidad funcional del paisaje se evaluaron el patrón de geodiversidad o heterogeneidad geocológica, la biodiversidad y la fragilidad del paisaje.

Geodiversidad. La geodiversidad resulta de la diferenciación de la estructura horizontal del paisaje y se cuantifica a partir de la composición tipológica, el número de polígonos y su superficie en un nivel taxonómico de la unidad respecto al nivel superior (Rowe 1995). En este trabajo, la geodiversidad y singularidad fueron determinadas a nivel de unidad superior. Para cada unidad se calcularon cuatro indicadores de geodiversidad: Complejidad Tipológica (CT, Snacken y Antrop 1983), Complejidad Corológica (CC, Snacken y Antrop 1983), Riqueza relativa de ecosistemas (R, Romme 1982, Turner 1989) y Diversidad de McIntosh (U, McIntosh 1967). Dado que R y U se utilizan en evaluaciones de biodiversidad, su aplicación en análisis de paisajes requiere sustituir las variables número de especies por tipos de paisajes y número de individuos por cantidad de polígonos (cuadro 9). Los valores de geodiversidad se agruparon en cinco categorías (muy alta, alta,

media, baja y muy baja), de acuerdo a sus valores máximo y mínimo. Las categorías se construyeron con los intervalos formados por rompimiento natural de Jenks en ArcGis v10.2 (ESRI 2013). Con la información de las categorías se construyeron cartogramas y gráficos de frecuencias para cada indicador para su análisis espacial y cuantitativo. Las ecuaciones de los indicadores se muestran en el cuadro 9.

Cuadro 9. Indicadores empleados para el cálculo de Geodiversidad del paisaje. Abreviaturas: n_i : número de polígonos de la clase i en la unidad, N : número total de polígonos en la unidad, N_c : número de subunidades en la unidad, N_{cmax} : número máximo de subunidades posibles en la unidad, A : área de la unidad.

Índice	Ecuación
Complejidad Corológica	$CC = n_i / A$
Complejidad Tipológica	$CT = n_i / N$
Riqueza Relativa de Ecosistemas	$R = N_c / N_{cmax}$
Diversidad de McIntosh	$U = \sqrt{\sum n_i^2}$

Biodiversidad. Se obtuvieron los registros georeferenciados de especies de flora y fauna silvestre a partir del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad de México (SNIB-CONABIO). Esta información fue comparada con el listado de especies de la norma NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT 2010) para conocer su estado de protección y el nivel de endemismo. Para cada unidad de paisaje se determinó la riqueza de flora y fauna silvestres, contabilizando el número de especies de flora y fauna silvestre presentes en cada unidad. Con base en el número máximo y mínimo de especies de flora y fauna presentes en las unidades de paisaje, se definieron cinco categorías de riqueza: muy alta, alta, media, baja y muy baja, a partir de intervalos formados por rompimiento natural de Jenks en el programa ArcGis v10.2 (ESRI 2013).

Fragilidad del paisaje. La fragilidad del paisaje está condicionada por la presencia de componentes o procesos con baja capacidad de recuperación ante una perturbación o afectación al ambiente. Diversos factores geográficos influyen en el grado de fragilidad que

un paisaje posee ante la ocurrencia de un disturbio. Como ejemplo, se pueden enlistar la pendiente del terreno, la superficie de suelo protegida por vegetación, el tipo de suelo, la intensidad de las precipitaciones, el uso que se haga del territorio, la presencia de elementos vegetales y animales susceptibles al disturbio, entre otros. En esta investigación se optó por utilizar la presencia de especies endémicas de flora y fauna, así como el grado de singularidad (S) de una unidad de paisaje para el análisis de Fragilidad. Esta decisión se debe a que la mayoría de las variables enlistadas se utilizaron como indicadores de potencial agrícola o de problemas ambientales.

De acuerdo a Mateo-Rodríguez (1984), la Singularidad del paisaje está dada por la proporción de polígonos en una unidad de paisaje respecto al total de polígonos en toda el área de estudio. De esta manera, cuando el número de polígonos en una unidad es muy pequeño, el valor de Singularidad se aproxima a cero, lo que implica Singularidad Muy Alta. La ecuación para calcular S es la siguiente:

$$S_i = n_i / N_{tot}$$

Donde:

n_i : número de polígonos en la unidad de paisaje "i"

N_{tot} : número total de polígonos en el área de estudio

En términos ecológicos, los paisajes altamente singulares pueden corresponder con ecosistemas raros o poco abundantes, donde las condiciones ambientales al interior son muy particulares. Esto a su vez podría estar determinando la presencia de endemismos restringiendo su área de distribución a los límites geográficos de la unidad. Los valores de S y el número de endemismos de flora y fauna fueron transformados en las cinco categorías ya mencionadas, por el mismo método de formación de intervalos y agrupación.

Finalmente, se calculó un valor de Estado Ambiental del Paisaje integrando las evaluaciones parciales de estabilidad funcional y problemas ambientales. Con los valores de Estado Ambiental se formaron cinco categorías por el método de K-medias. Este método de agrupación permite la formación de grupos o conglomerados en los que, cada elemento al interior es estadísticamente similar al promedio grupal. El análisis K-medias se

realizó en el ambiente estadístico R v3.2.2 (R Core Team 2015). El esquema de evaluación del Estado Ambiental se muestra en la figura 4.

3.2.5 Sustentabilidad ambiental de paisajes agrícolas

La evaluación de Sustentabilidad Ambiental se centró en los paisajes que fueron clasificados como principalmente y medianamente agrícolas. En este sentido, un paisaje agrícola se consideró sustentable cuando existió compatibilidad entre su uso y el potencial agrícola, además de poseer estabilidad ambiental del paisaje (alta estabilidad funcional y escasa incidencia de problemas ambientales). De esta manera, cada unidad de paisaje agrícola se asignó a una de cinco categorías de sustentabilidad ambiental de acuerdo a un análisis de conglomerados formados por K-medias. El esquema de evaluación de sustentabilidad se muestra en la figura 4.

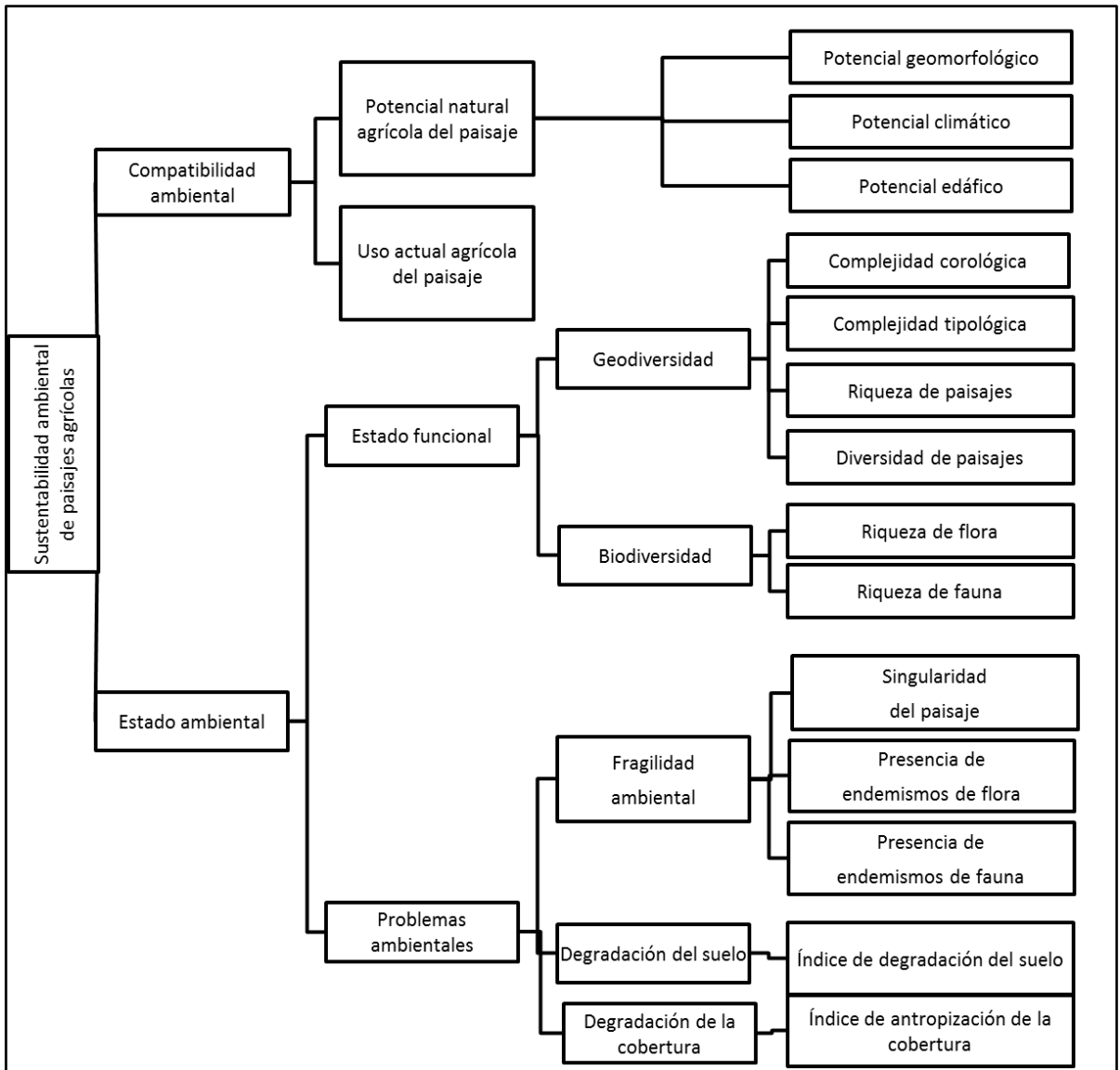


Figura 4. Esquema de evaluación de la sustentabilidad ambiental. Fuente: elaboración propia a partir de Mateo (2012).

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.

4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA DEL PAISAJE EN PUEBLA

El análisis integrado de la geomorfología, el clima y la litología permite identificar procesos en el paisaje cómo la génesis y evolución, en tanto que la inclinación del terreno permite inferir procesos más dinámicos como el transporte superficial y acumulación de materiales, la formación o pérdida de suelos y la dinámica de la cobertura vegetal y sus usos potenciales. Con la finalidad de profundizar en la estructura y organización espacial de estos factores, primeramente se presenta su descripción por separado y en seguida se describe el resultado de su integración en unidades de paisaje.

Geomorfología. Aproximadamente 32% (10900 km²) de Puebla se clasificó como unidades de montaña; 26% (8775 km²) correspondió a lomeríos; 18% (6000 km²) a valles fluviales; 22% (7500 km²) a planicies y 3% (989 km²) a unidades de piedemonte. La figura 5 muestra su mapa de distribución. De acuerdo a su geomorfología, se puede deducir que el Estado de Puebla posee procesos denudo-gravitacional altamente dinámicos, ya que montañas y lomeríos existen en 60% de la superficie total. Por consiguiente, es importante considerar esta particularidad en los programas de ordenamiento y planificación de usos del territorio, incluyendo la agricultura, de lo contrario aumentará la superficie afectada por erosión del suelo, específicamente cuando se cultiva en laderas inclinadas, como ha sido documentado por Ruíz-Careaga *et al.* (2005).

Clima. Se distinguen 16 tipos de clima, predominando el templado subhúmedo (incluye C(w₀), C(w₁), C(w₂)) en 32% del Estado (10900 km²); el semicálido subhúmedo ((A)C(w₀) y (A)C(w₁)) se distribuye en 13% (4500 km²); los tipos cálido subhúmedo (Awo), semiárido templado (BS1kw), templado húmedo (C(f), C(m), C(m)(f)) y cálido húmedo (Am, A(f), Am(f)), abarcan menos de 10% cada uno (9, 8, 8 y 8% respectivamente). Los demás tipos climáticos y la superficie abarcada se se muestran en la figura 6.

Litología. De los once tipos litológicos presentes, la categoría depósitos aluviales es la más abundante (28% del Estado, 9540 km²). Las rocas sedimentarias carbonatadas (calizas y caliches) ocupan 19% (6525 km²), las rocas volcánicas intermedias (andesitas, brecha y toba intermedia), 12% (4040 km²) y las rocas metamórficas de diversa composición 10% (3,338 km²). El resto de los tipos litológicos y la superficie barcada se muestran en la figura 7.

Pendiente del terreno. Con base en la evaluación, se encontró que 1.5% (518 km²) del Estado, posee pendientes mayores a 30°; en 45% (15500 km²) las pendientes varían entre 10 y 30°; en 24% (8200 km²) varían entre 5 a 10°, en 10% (3600 km²) varían entre 3 a 5° y en 19% (6500km²) las pendientes son menores a 3°. La dimensión de los intervalos de inclinación corresponden a los propuestos por Priego-Santander *et al.* (2010). La figura 8 muestra el mapa de pendientes del terreno.

Con base en el enfoque paisajístico empleado, la geomorfología, el clima y la litología son los principales factores de diferenciación de la estructura del paisaje, mientras que la vegetación, el uso del suelo y edafología proporcionan información sobre la dinámica e intensidad de uso del mismo.

Cobertura vegetal-uso del suelo. Se registraron 17 tipos: el principal uso del suelo es agricultura de temporal (38%, 12800 km²) mientras que el tipo de cobertura vegetal más abundante es la selva baja caducifolia (17%, 5670 km²). En una categoría se agrupó los diferentes tipos de matorral (espinoso, desértico, rosetófilo, crasicaule) con el chaparral, la cual abarca 8% (2746 km²). Le siguen en importancia la agricultura de riego (6.8%, 2290 km²); los pastizales inducidos (6.2%, 2100 km²) y el bosque de pino (5%, 1740 km²). El mapa de cobertura vegetal-uso del suelo de los paisajes se muestra en la figura 9. En conjunto el uso agropecuario (agricultura temporal-riego y pastizal inducido) abarca 50% del Estado (17265 km²).

Edafología. Existen 16 grupos principales de suelos, de los cuales los Leptosoles (36%, 12234 km²) y Regosoles (18%, 6435 km²) son los más abundantes en el Estado. Ambos

tipos presentan limitaciones para la agricultura debido al escaso desarrollo del perfil y alto contenido de rocas. El grupo Andosoles (suelos derivados de cenizas volcánicas) ocupan 10% (3392 km²) principalmente asociados a paisajes volcánicos. El grupo Phaeozems (de importancia agrícola por su buen desarrollo del perfil y alto nivel de materia orgánica) se distribuyen en 9% (3185 km²). Los 12 grupos restantes ocupan 26% del Estado (8904 km²). El mapa de distribución de los tipos edáficos se muestra en la figura 10.

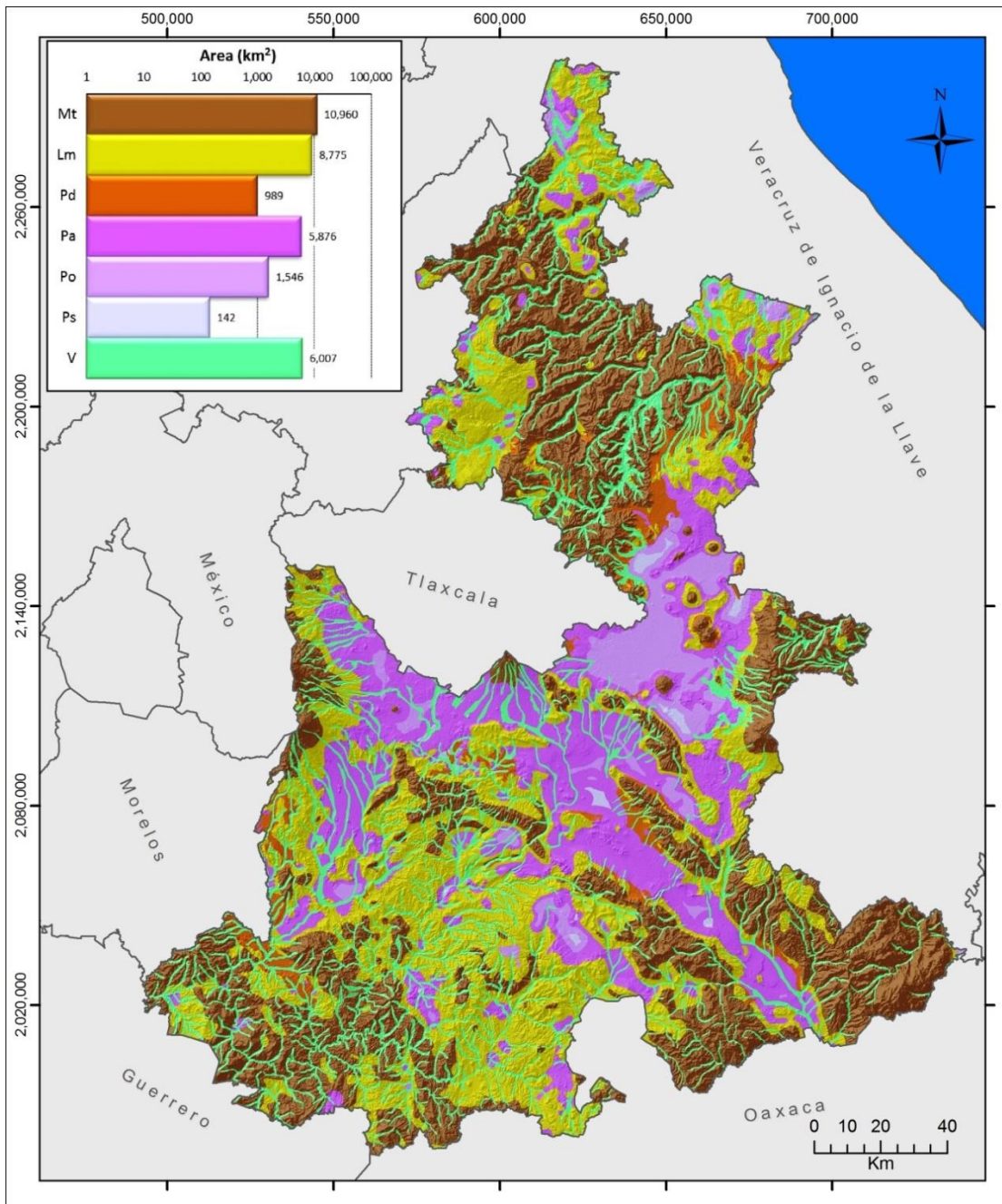


Figura 5. Mapa de tipos de relieve en el Estado de Puebla. Fuente: Flores-Domínguez *et al.* (2014a). Abreviaturas: Mt: Montañas, Lm: Lomeríos, Pd: Piedemonte, Pa: Planicies acolinadas, Po: Planicies onduladas, Ps: Planicies subhorizontales, V: Valles fluviales

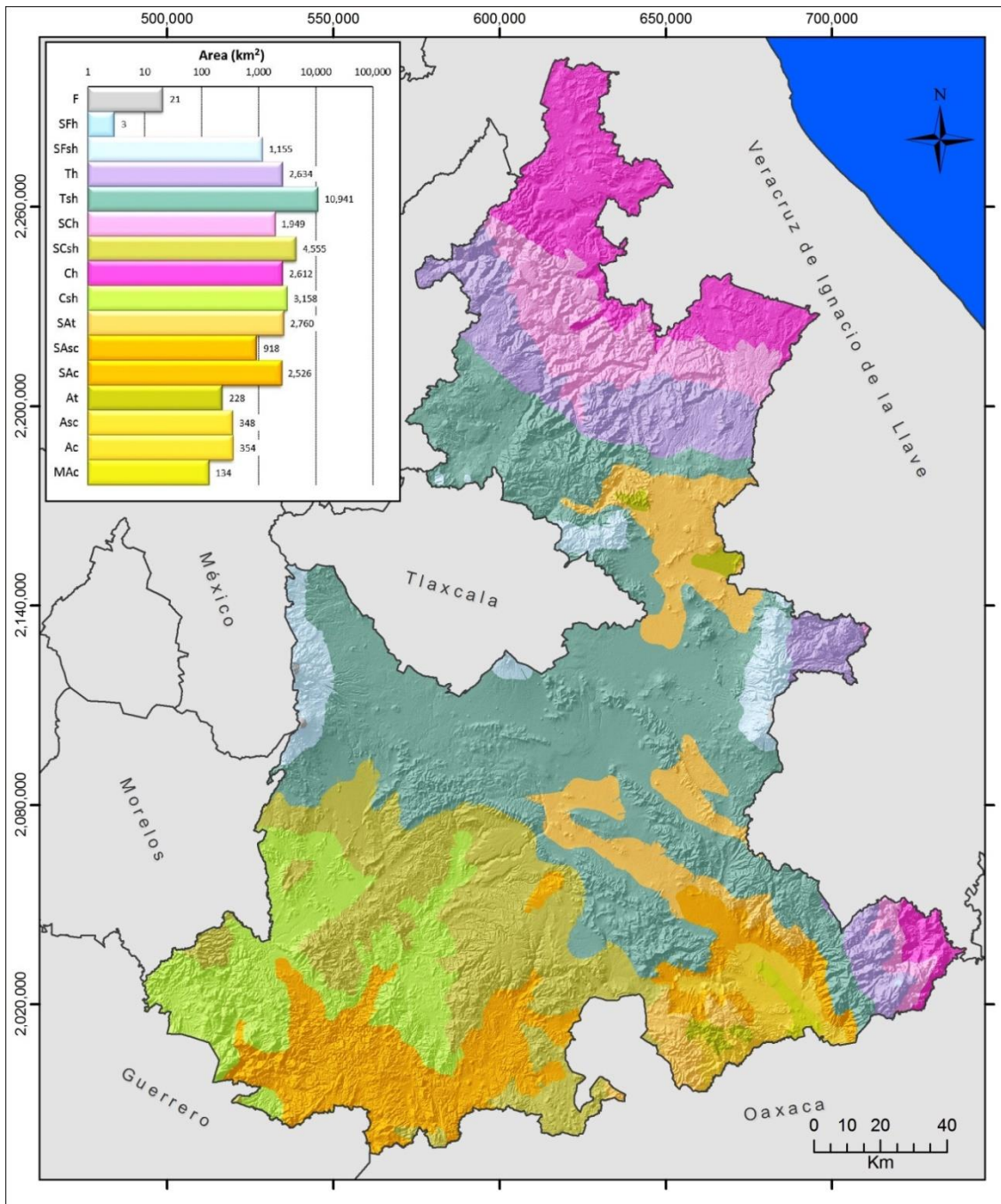


Figura 6. Mapa de tipos climáticos en el Estado de Puebla. Fuente: Flores-Domínguez *et al.* (2014a). Abreviaturas: F: frío, SF: semifrío, T: templado, SC: semicálido, C: cálido, SA: semiárido, A: árido, MA: muy árido, h: húmedo, sh: subhúmedo.

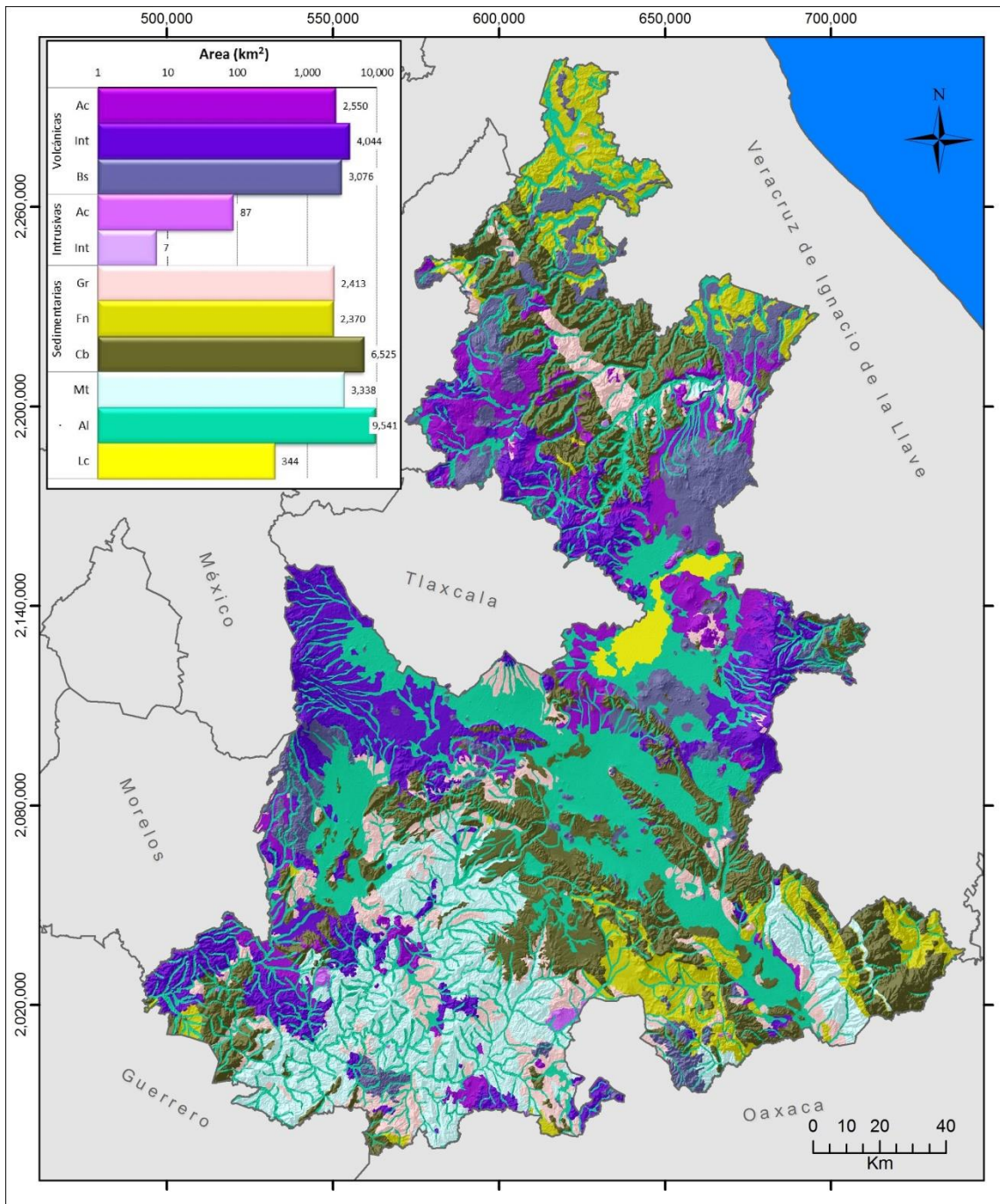


Figura 7. Mapa de tipos litológicos en el Estado de Puebla. Fuente: Flores-Domínguez *et al.* (2014a).
 Abreviaturas: Ac: ácidas, Int: intermedias, Bs: básicas, Gr: gruesas, Fn: finas, Cb: carbonatadas, Mt: metamórficas, Al: aluvial, Lc: lacustre

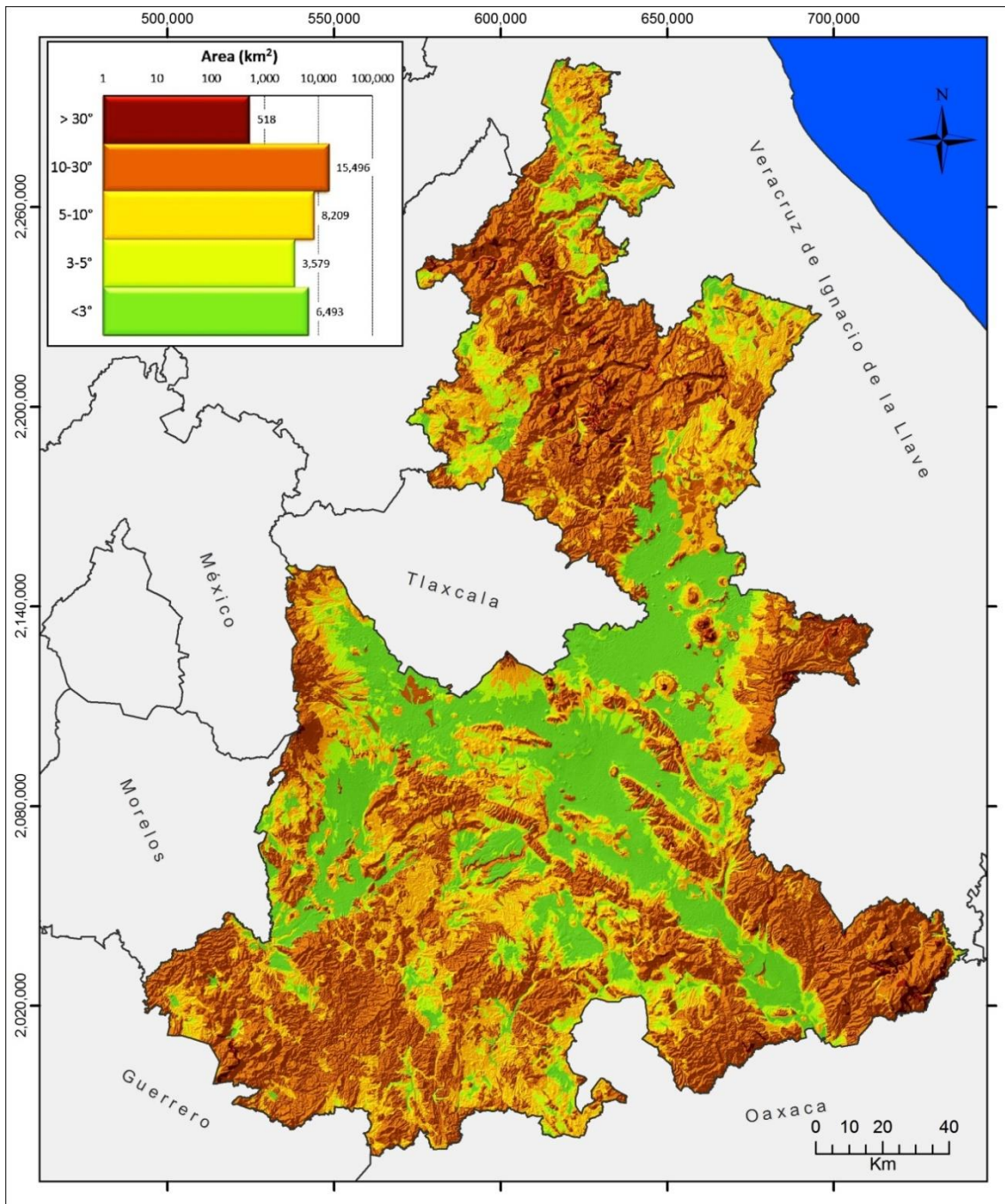


Figura 8. Mapa de clases de pendiente del terreno en el Estado de Puebla. Fuente: Flores-Domínguez *et al.* (2014a).

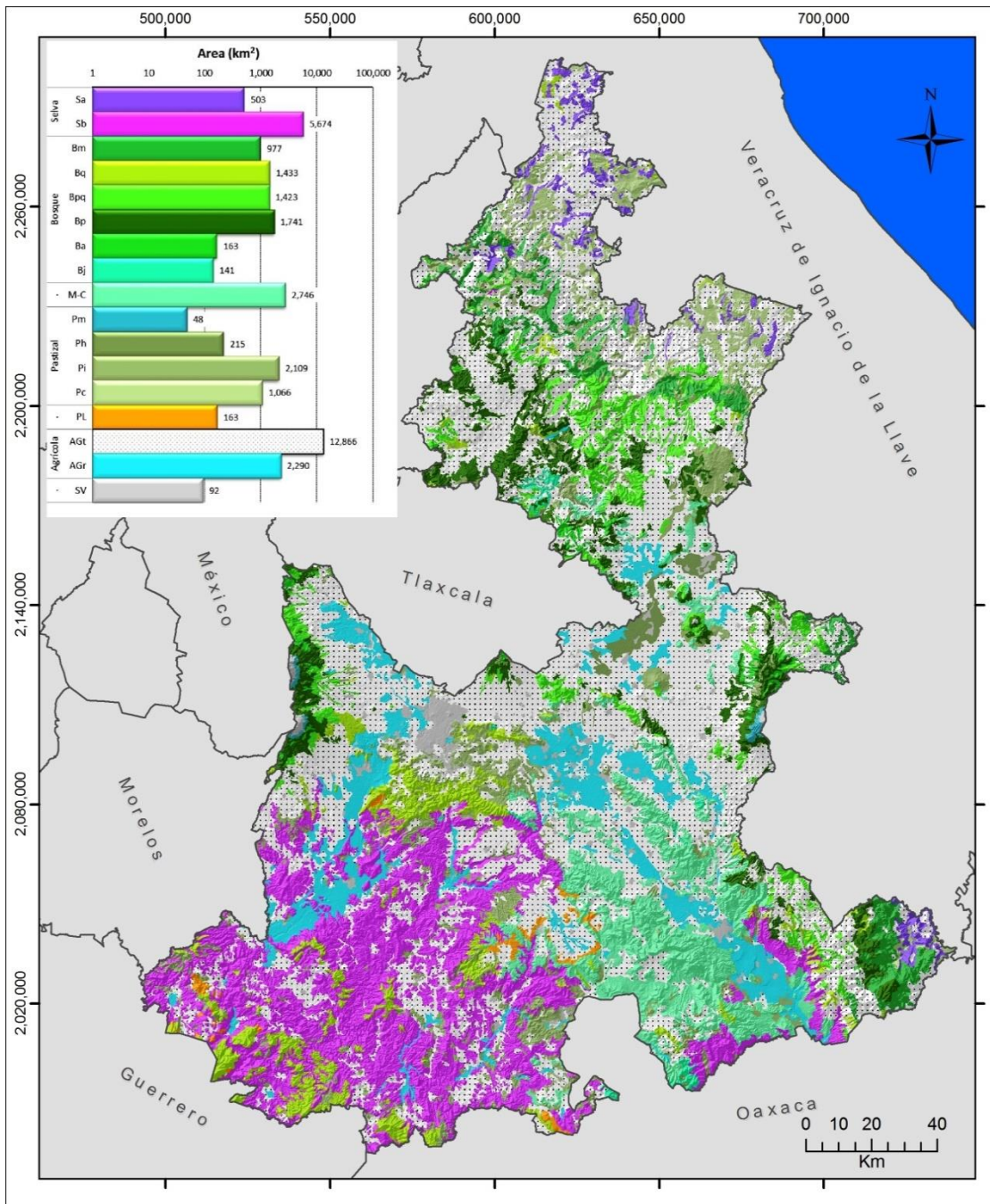


Figura 9. Mapa de cobertura vegetal-uso del suelo en el Estado de Puebla. Fuente: Flores-Domínguez *et al.* (2014a). Abreviaturas: Sa: selva alta, Sb: selva baja, Bm: bosque mesófilo bq: encinar, Bp: pinar, Ba: bosque de oyamel, Bj: bosque de juníferos, M-C: matorral-chaparral, Pm: pradera de montaña, Ph: pastizal halófilo, Pi: pastizal inducido, Pc: pastizal cultivado, PL: palmar, AG: agricultura, t: temporal, r: riego SV: sin vegetación aparente

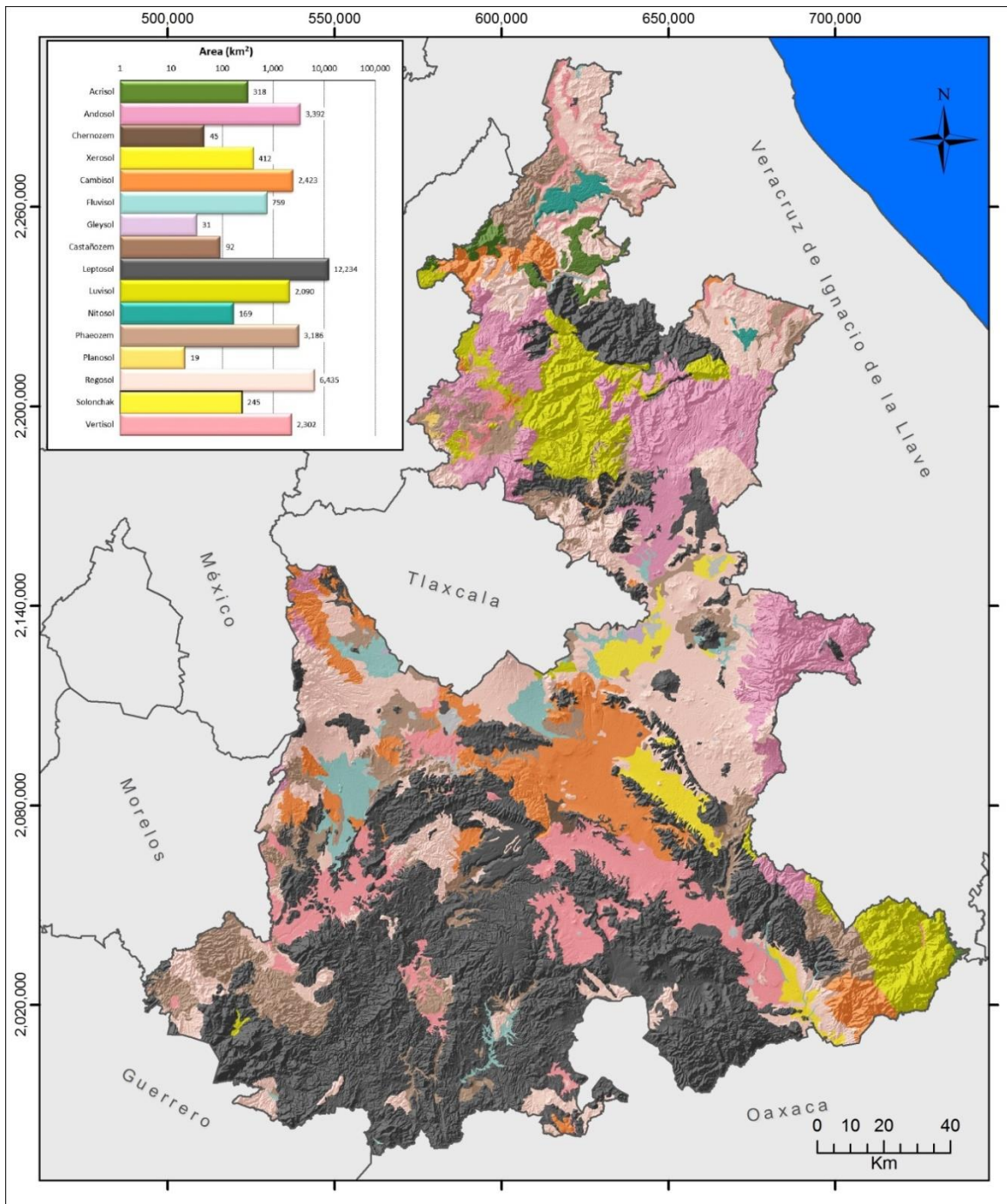


Figura 10. Mapa de tipos de suelo principales en el Estado de Puebla. Fuente: Flores-Domínguez *et al.* (2014a).

4.1.1 Unidades de paisaje

Resultado de la integración de los componentes del paisaje, se identificaron 291 unidades superiores, 347 unidades inferiores complejas y 717 unidades inferiores simples. A continuación se describen las cinco unidades superiores con mayor superficie, las cuales abarcan en conjunto 18% (6 mil km²) del total estatal. La descripción de todas las unidades de paisaje del nivel superior, inferior complejo y simples, así como el mapa de paisajes se pueden consultar en Flores-Domínguez *et al.* (2014b).

La unidad **LXVI** es la de mayor superficie en el Estado y comprende valles fluviales formados por depósitos aluviales en clima templado subhúmedo. Esta unidad se distribuye en 1673 km² (4.9% del estado) principalmente en los valles intermontanos que se forman en los volcanes Popocatepetl, Iztaccihuatl y La Malinche, cercanos a la ciudad de Puebla. Además comprende los valles formados por los escurrimientos del Pico de Orizaba al este del Estado, así como los valles que ocurren en los municipios de Chignahuapan, Aquixtla, Ixtacamaxtitlán y Libres, que colindan con el Estado de Tlaxcala. También se ubica una parte en los valles del sureste del Estado en la porción templada de los municipios de Tlacotepec, Juan N. Méndez, Atexcal, Tehuacán y Chapulco principalmente. Los principales tipos de cobertura vegetal del suelo son cultivos agrícolas principalmente de temporal, bosques templados, matorral-chaparral, algunos fragmentos de selva caducifolia y pastizales inducidos. Respecto al tipo de suelo, se distribuyen principalmente Luvisoles, Regosoles, Leptosoles, Pahozems, Cambisoles, Castañozems.

La siguiente unidad es la **XXXVI** integrada por montañas tectónicas formadas por rocas sedimentarias (calizas y caliza-lutita) en clima templado subhúmedo, distribuida en 3.7% del Estado (1281 km²). Los principales municipios donde se encuentran estos paisajes son Huaquechula, Atlixco, Teopantlán, Huehuetlán El Grande, el sur del municipio de Puebla y Tzicatlacoyan, todos en la parte central del Estado. Otra parte se distribuye en la formación montañosa que comparten los municipios de Molcaxac, Xochitlán Todos Santos, Tlacotepec, Juan N. Méndez, Atexcal y Tehuacán, así como Palmar de Bravo, Yehualtepec, Tlacotepec y Cañada Morelos al sureste del Estado; Quecholac, San Juan Atenco y Felipe

Ángeles al este; y Tetela de Ocampo, Zacatlán, Aquixtla y Zautla al norte del Estado. La cobertura vegetal del suelo está compuesta por bosque templado, cultivos agrícolas, matorral, pastizal inducido y selva caducifolia. Los suelos principales son Luvisoles, Regosoles, Phaeozems, Leptosoles y Cambisoles.

La tercera unidad es la **LIII** conformada por planicies fluviales acolinadas formadas por depósitos aluviales en clima templado subhúmedo en 1162 km² (3.4%). Se localiza en las zonas de planicies de los municipios de San Martín Texmelucan, Huejotzingo, Tlaltenango, Coronango, Cuautlancingo, Puebla, Amozoc, Acajete, Tepeaca, Hueyotlipan, Acatzingo, Los Reyes de Juárez, Huixcolotla, Tecamachalco y Quecholac; así como algunas partes de Atlixco, Tlacotepec, Xochitlán, Yehualtepec, Cañada Morelos y Esperanza. Los tipos principales de cobertura vegetal incluyen pastizales inducidos, cultivos agrícolas, bosque templado y matorral-chaparral. Los tipos de suelo principales son Leptosoles, Regosoles, Fluvisoles, Castañozems y Cambisoles.

La cuarta unidad **LXXI** corresponde a montañas tectónicas formadas por rocas calizas en clima semicálido húmedo distribuidas en 935 km² (2.7%). Se ubica principalmente en la zona montañosa al norte del Estado, en los municipios de Tlacuilotepec, Xicotepec, Tlaola, Jopala, Tlapaoya, Tepatlán, Camocuautla, Coatepec, Hueytlalpan, Huehuetla y Cuetzalan. Otra zona más pequeña ocurre en los municipios de Eloxochitlán, Ajalpan, Zoquitlán, Coyomeapan y San Sebastián Tlacotepec. La cobertura vegetal del suelo corresponde a bosque mesófilo y de pino-encino, selva alta perennifolia en laderas mayores a 10° y cultivos agrícolas y pastizales inducidos en las partes menos inclinadas. Los tipos de suelos principales son Leptosoles, Luvisoles, Cambisoles y Regosoles.

La quinta unidad **XX** está conformada por montañas tectónicas formadas por rocas sedimentarias (calizas) en clima templado húmedo distribuidas en 929 km² (2.7%). Se distribuye principalmente al norte del Estado, en las montañas de los municipios de Pahuatlán, Naupan, Huauchinango, Chiconcuautla, Zacatlán, Tetela de Ocampo, Cuautempan, Xochitlán de Vicente Suárez, Nauzontla y Zacapoaxtla. Además se distribuye en pequeñas áreas al este y sureste del Estado; los municipios al este incluyen Quimixtlán

y Chichiquila colindantes con el Estado de Veracruz, mientras que en el sureste, los municipios son Ajalpan, Zoquitlán y Coyomeapan. La cobertura vegetal del suelo incluye bosques templados, campos agrícolas y pastizales inducidos. Los tipos de suelo principales son Luvisoles, Regosoles y Leptosoles. La figura 11 muestra el mapa de ubicación de las cinco unidades descritas previamente, mientras que el cuadro 10 contiene la composición físico-geográfica del paisaje. Una reducción del mapa de unidades de paisaje de Puebla se muestra en la figura 12.

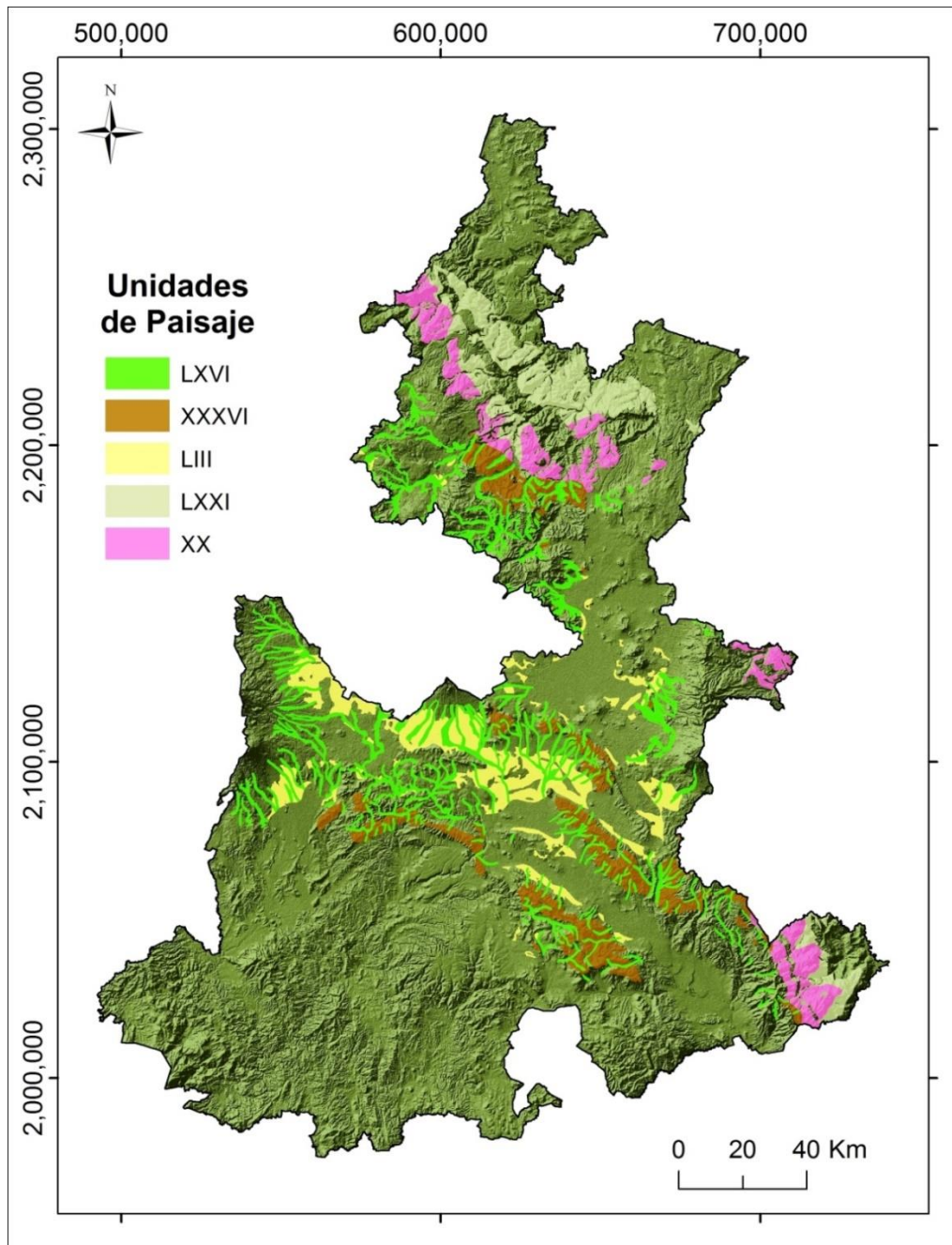


Figura 11. Mapa de la distribución de las cinco principales unidades de paisaje en el Estado de Puebla.
Fuente: elaboración propia.

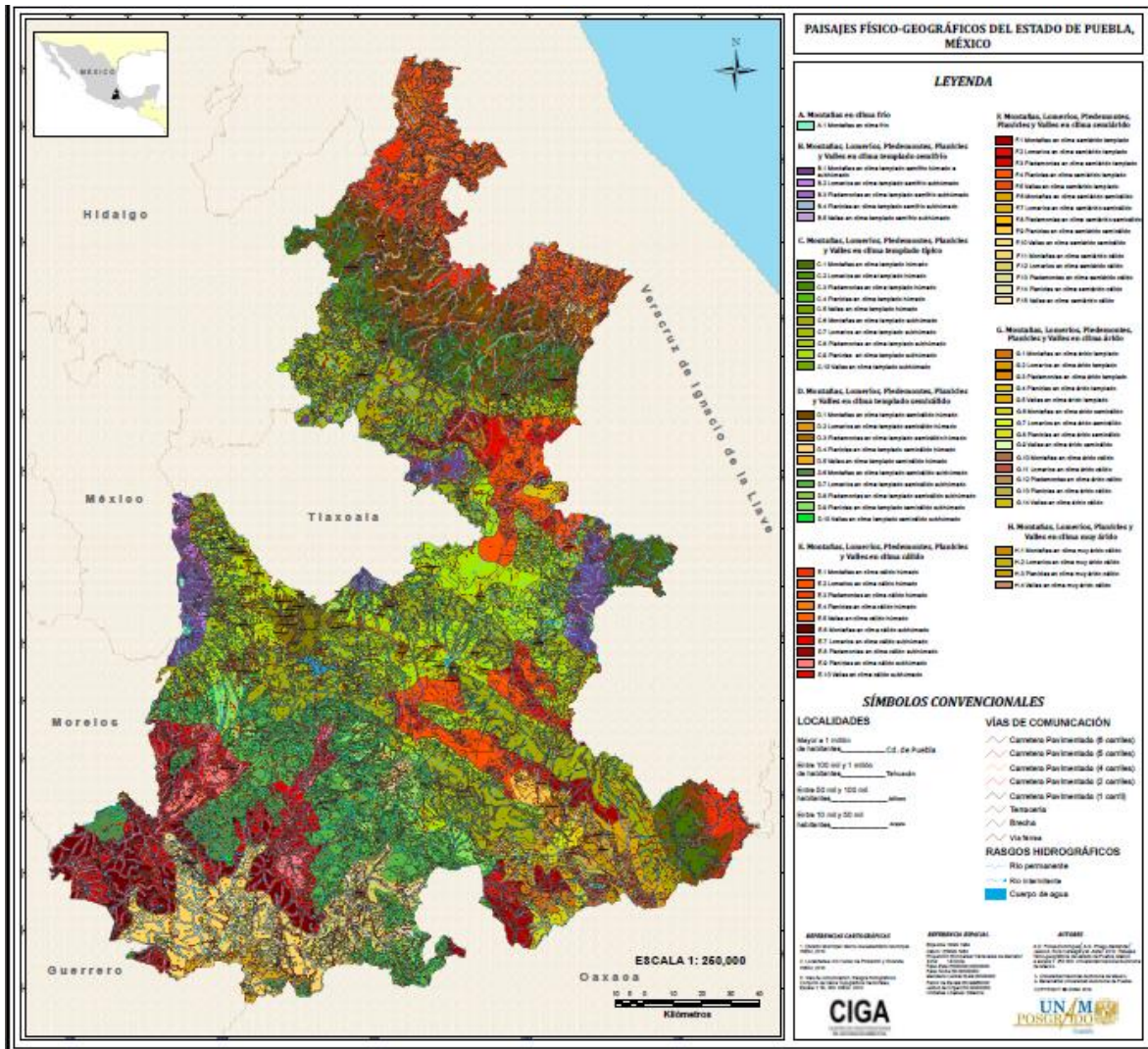


Figura 12. Reducción del mapa de paisajes físico-geográficos del Estado de Puebla. Fuente: Flores-Domínguez et al. 2014b.

Cuadro 10. Estructura jerárquica y superficie (km²) de los componentes paisajísticos en el Estado de Puebla.

Fuente: Elaboración propia

RELIEVE	Lt	CLIMA																
		F	SF _h	SF _{sh}	T _h	T _{sh}	SC _h	SC _{sh}	C _h	C _{sh}	SA _t	SA _{sc}	SA _c	A _t	A _{sc}	A _c	MA _c	
Montañas	(500 < DV < 1000 m/km ²)	V _{ac}	0	0	55	94	168	118	38	0	17	21	0	5	0	0	0	0
		V _{int}	17	0	664	64	555	0	221	0	217	48	15	84	25	0	1	0
		V _{bas}	4	0	44	171	79	80	5	55	0	128	0	21	14	7	0	0
		I _{ac}	0	0	0	1	0	0	17	0	8	5	0	0	2	2	0	0
		I _{int}	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
		S _{gr}	0	0	33	220	70	201	86	4	68	30	82	78	1	2	16	0
		S _{fin}	0	0	0	67	230	67	5	335	4	86	84	11	48	56	3	0
		S _{ca}	0	3	0	929	1,281	935	143	259	291	152	79	72	31	54	18	13
		M	0	0	0	54	187	4	209	0	317	58	163	685	0	60	0	0
Lomeríos	(80 < DV < 100 m/km ²)	V _{ac}	0	0	0	46	481	17	17	0	43	25	0	70	2	0	0	0
		V _{int}	0	0	129	1	676	0	156	0	250	22	4	48	0	0	15	0
		V _{bas}	0	0	11	224	550	51	87	268	47	125	10	65	0	3	0	0
		I _{ac}	0	0	0	0	0	0	17	0	2	2	0	15	0	0	0	0
		S _{gr}	0	0	0	7	149	4	489	8	149	45	62	154	0	2	44	7
		S _{fin}	0	0	0	0	140	1	94	680	38	23	71	3	0	39	15	0
		S _{ca}	0	0	0	10	642	20	530	17	122	143	6	74	8	7	16	10
		M	0	0	0	0	14	0	798	0	270	7	3	375	0	0	0	0
Pd		V _{ac}	0	0	4	151	222	85	42	2	122	113	16	46	8	0	22	0
		Al	0	0	0	0	136	0	3	0	2	7	4	4	0	0	1	0
Planicies acolinadas	(20 < DV < 30 m/km ²)	V _{ac}	0	0	0	17	309	0	0	0	6	96	0	0	2	0	0	0
		V _{int}	0	0	0	0	662	0	13	0	76	7	0	2	0	0	3	0
		V _{bas}	0	0	0	13	321	49	2	155	0	284	2	0	2	0	0	0
		I _{ac}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	13	0	0	0	0
		S _{gr}	0	0	8	0	130	0	76	0	95	25	16	25	0	0	18	3
		S _{fin}	0	0	0	0	5	0	99	65	0	0	1	0	0	13	0	0
		S _{ca}	0	0	0	0	236	0	177	0	23	73	4	9	0	13	11	27
		M	0	0	0	0	0	0	45	0	35	0	12	41	0	0	0	0
		Al	0	0	0	0	1,162	0	283	11	113	625	135	21	10	31	105	54
LC	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0		
Planicies onduladas	(5 < DV < 10 m/km ²)	V _{ac}	0	0	0	0	15	0	0	0	0	56	0	0	0	0	0	0
		V _{int}	0	0	0	0	63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		V _{bas}	0	0	0	0	81	0	0	74	0	26	0	0	0	0	0	0
		S _{gr}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
		S _{fin}	0	0	0	0	0	0	0	83	0	0	0	0	0	0	0	0
		S _{ca}	0	0	0	0	16	0	61	0	1	0	0	0	0	0	0	0
		Al	0	0	0	0	423	0	36	26	31	171	15	6	17	0	1	2
		LC	0	0	0	0	188	0	0	0	0	107	0	0	45	0	0	0

Planicies subhorizontales	V _{int}	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	V _{bas}	0	0	0	0	13	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0
	S _{gr}	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
	S _{fin}	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	S _{ca}	0	0	0	0	7	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
	Al	0	0	0	0	46	0	0	0	2	45	7	0	0	0	0	0
Valles	Al	0	0	207	560	1,673	317	805	565	807	201	127	592	14	57	64	19

Abreviaturas: Lt: litología, V: volcánica, ac: ácida, int: intermedia, bas: básica, I: intrusiva, S: sedimentaria, gr: gruesa, fin: fina, ca: carbonatada, M: metamórfica, Al: aluvial. F: frío, T: templado, C: cálido, A: árido, S: semi, M: muy, h: húmedo, sh: subhúmedo, t: templado, sc: semicálido, c: cálido.

4.2 POTENCIAL NATURAL DEL PAISAJE PARA LA AGRICULTURA

Para determinar el potencial natural agrícola, se hizo primero el cálculo de los potenciales individuales del relieve, edáfico y climático. Los resultados de todas las evaluaciones realizadas en este trabajo, se presentan por unidades superiores, ya que en este nivel hubo una mayor diferenciación cartográfica e identificación de patrones, que en el nivel inferior.

4.2.1 Potencial del relieve

De acuerdo a la evaluación aquí presentada, 12% del Estado (7600 km²) posee potencial Muy alto o Alto para la agricultura, mientras que 10% (4000 km²) tuvo potencial Medio y 78% (22500 km²) Muy bajo y Bajo (cuadro 11). Los paisajes con mayor potencial se encuentran en planicies fluviales o tectónicas, así como terrazas de valles distribuidas en el centro-oriente del Estado principalmente (figura 13). No obstante, en el Estado hay mayor abundancia de paisajes con bajo potencial dada la complejidad geomorfológica ya que en el norte, noreste y sur, existen serranías, mientras que la parte central del Estado se ubica dentro de la Faja Volcánica Transmexicana que incluye además los tres volcanes con mayor elevación del país (INEGI 2000, CONABIO 2011). De acuerdo a la clasificación morfométrica del relieve en Puebla (Flores-Domínguez *et al.* 2004a), 60% del Estado corresponde a montañas o lomeríos (geoformas con disección vertical > 40m/km²) donde es común la

erosión de terrenos agrícolas como ha sido documentado por Borja y Alcántara (2004) y Ruíz-Careaga *et al.* (2005) para la Sierra Norte. Sin embargo, la agricultura en laderas es una práctica común en regiones tropicales de América que ha permitido la subsistencia de la población campesina que las habita (Posner y McPherson 1982). En este sentido, aproximadamente 6500 km² (19%) del Estado de Puebla son laderas donde se practica la agricultura (Flores-Domínguez *et al.* 2004b) y es necesario implementar programas de conservación de suelos sobre todo para los más susceptibles a la erosión como los Phaeozems, Castañozems y Luvisoles (Ruíz-Careaga *et al.* 2004).

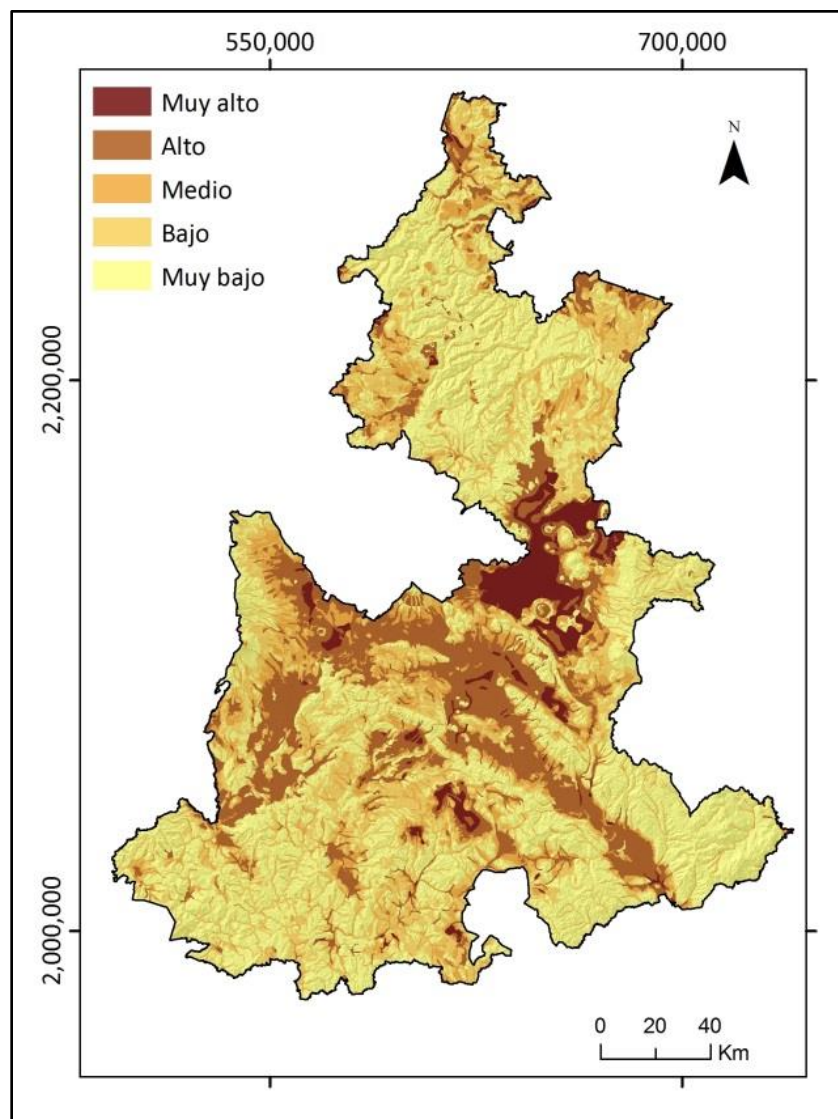


Figura 13. Potencial natural del relieve para la agricultura de temporal en el Estado de Puebla. Fuente: Elaboración propia

Cuadro 11. Superficie (km²) abarcada por cada categoría de potencial del relieve para la agricultura. Fuente: Elaboración propia

Potencial	Superficie potencial de acuerdo a la DV (km ²)	Superficie potencial de acuerdo a la densidad del drenaje superficial (km ²)	Superficie potencial de acuerdo a la inclinación del terreno (km ²)	Superficie potencial de acuerdo al modelo integral del relieve (km ²)
Muy alto	1,349	363	6,493	1,494
Alto	1,851	5,984	3,579	6,148
Medio	142	27,934	0	4,190
Bajo	16,101	15	8,209	8,187
Muy bajo	14,851	0	16,015	14,276

4.2.2 Potencial climático

En el Estado existen 16 tipos climáticos (INEGI 2000) de los cuales, el templado subhúmedo (C_{w0} , C_{w1} , C_{w2}) y semicálido subhúmedo (AC_{w0} , AC_{w1} , Garcia 1987) son los principales ya que abarcan 32 y 13% del Estado respectivamente (10900 y 4500 km²). Los demás tipos se distribuyen en menos de 10% del Estado cada uno. Es importante señalar que en más de 50% del Estado ocurren precipitaciones mayores a 700 mm anuales, mientras que las áreas con temperatura entre 19 a 21°C ocurren en 20%. Estas condiciones climáticas son las adecuadas para para el desarrollo de cultivos considerados en este trabajo.

La humedad y temperatura registrada en gran parte del territorio poblano son adecuadas para el frijol, ya que 60% del Estado posee potencial Muy Alto y 30% Alto (20500 y 11000 km² respectivamente). Para la cebada y manzana también existe gran potencial ya que 70 y 60% del Estado (24000 y 21000 km² respectivamente) se clasificaron con Muy Alto o Alto. No obstante que el maíz es una planta con gran diversidad de variedades y razas adaptadas localmente a su ambiente, el área con potencial climático para este cultivo fue de 19000 km² (55%). La figura 14 muestra los mapas de potencial climático por cultivo, mientras que los datos de superficie se pueden consultar en el cuadro 12.

4.2.3 Potencial edáfico

En el Estado existen 16 grupos principales de suelos (INEGI 2007) siendo Leptosoles y Regosoles los de mayor distribución (36 y 18% respectivamente), sin embargo estos tienen fuertes limitaciones para la agricultura dado el poco desarrollo del perfil y la alta presencia de rocas en los horizontes cultivados. Los Andosoles y Phaeozems poseen textura adecuada y alta fertilidad para la agricultura (INEGI 2004a, Iuss 2007, Bautista *et al.* 2009) sin embargo solo se encuentran en 10% y 9% del área, respectivamente. No obstante el uso agrícola de Andosoles requiere la adición de mejoradores del suelo dado su alta concentración de aluminio que puede ser tóxico para algunas plantas, así como la alta capacidad de retención de fósforos en forma de fosfatos con baja disponibilidad para las plantas (Arnalds 2008). El resto de los tipos de suelo abarcan 26% del Estado en conjunto.

En términos edáficos, el maíz posee gran potencial ya que 53 y 45% (18200 y 15500 km²) se clasificaron con Muy Alto y Alto potencial. El sorgo, frijol y haba también muestran potencial ya que 83, 65 y 60% (28400, 22200 y 20600 km²) se clasificaron como Alto o Muy Alto. Los demás cultivos poseen potencial en menos de 50% del Estado. La figura 15 muestra los mapas de potencial edáfico por cultivo, mientras que los datos de superficie se pueden consultar en el cuadro 12.

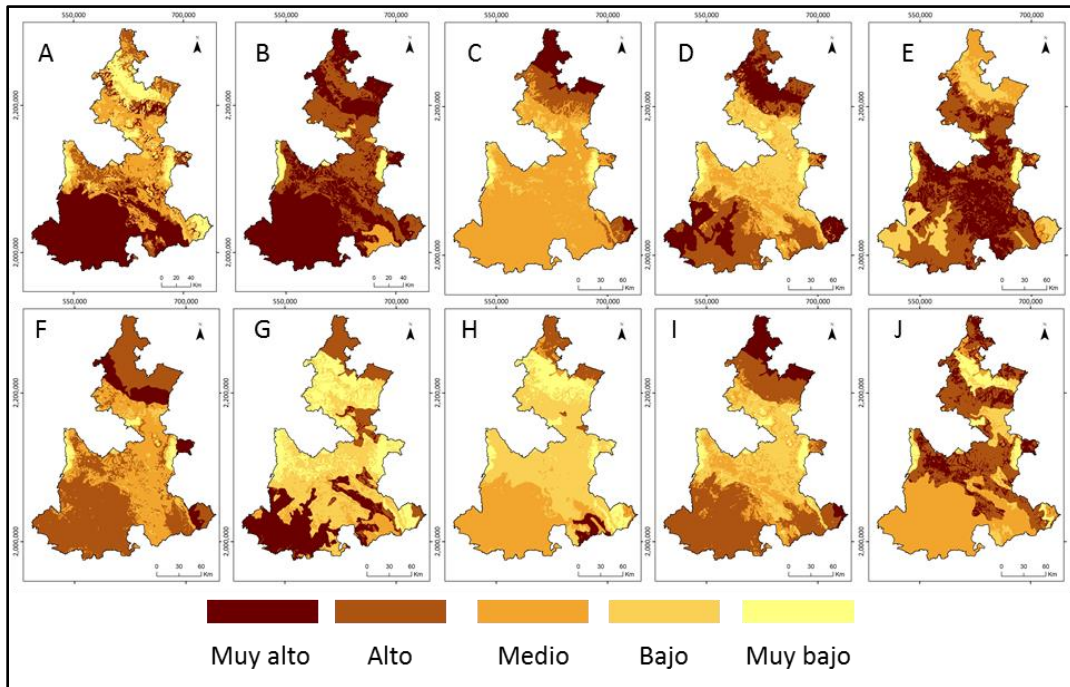


Figura 14. Mapas de potencial climático para los principales cultivos de temporal en Puebla: A) maíz, B) frijol, C) café arábica, D) café robusta, E) cebada, F) manzana, G) sorgo, H) sorgo dulce, I) naranja, J) haba. Fuente: Elaboración propia con datos de CNA 2011, FUPPUE 2011, INIFAP 2011

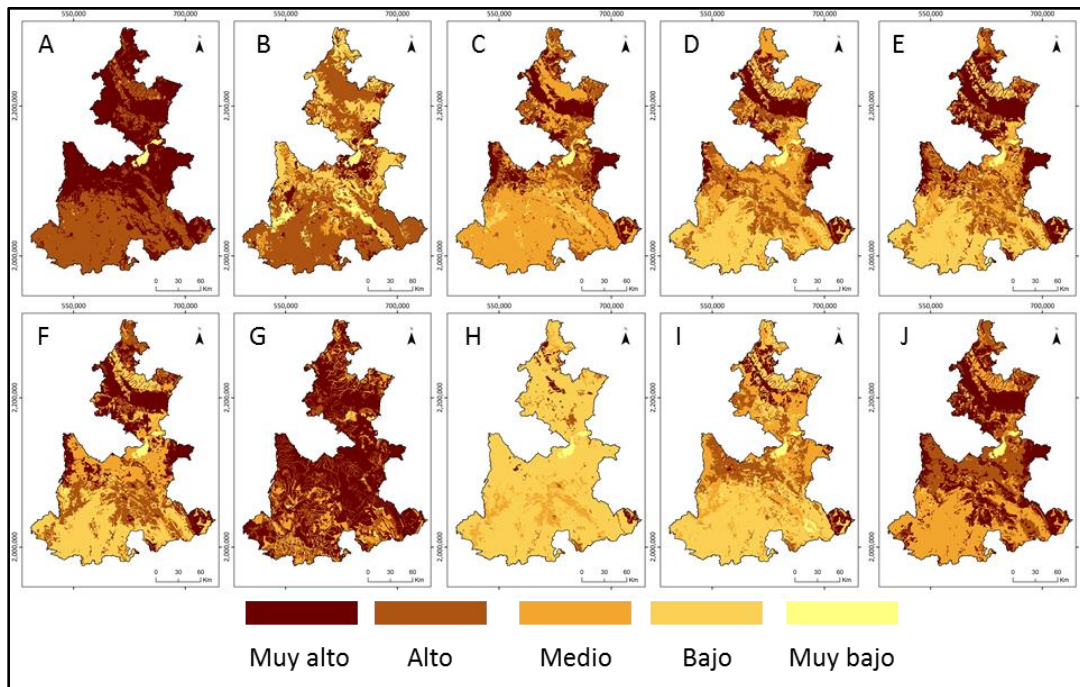


Figura 15. Mapas de potencial edáfico para los principales cultivos de temporal en Puebla: A) maíz, B) frijol, C) café arábica, D) café robusta, E) cebada, F) manzana, G) sorgo, H) sorgo dulce, I) naranja, J) haba. Fuente: Elaboración propia con información de INEGI 2004a y b

Cuadro 12. Superficie (km²) abarcada por categoría de potencial edáfico y climático para todos los cultivos.

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI 2004a y b, CNA 2011, FUPPUE 2011, INIFAP 2011

Factor	Potencial	Maíz	Café arabica	Frijol	Cebada	Naranja	Sorgo	Haba	Manzana	Café robusta	Sorgo dulce
Clima	Muy alto	14,411	2,612	20,493	10,922	2,612	7,519	4,630	2,634	7,127	783
	Alto	4,472	3,661	11,560	13,407	15,116	4,460	10,802	18,455	10,190	2,023
	Medio	8,134	24,553	950	3,213	6,206	2,729	13,802	10,978	6,281	11,957
	Bajo	4,012	2,543	120	5,837	8,896	11,717	2,768	1,342	9,307	15,068
	Muy bajo	3,268	926	1,173	915	1,465	7,870	2,294	886	1,391	4,465
Suelo	Muy alto	18,265	6,642	3,140	9,022	2,575	22,287	11,802	8,836	5,369	738
	Alto	15,443	6,815	19,043	7,073	5,971	6,175	8,855	6,624	7,826	854
	Medio	211	18,085	2,505	5,997	8,987	4,840	12,996	7,011	9,681	3,538
	Bajo	29	2,407	7,390	11,816	16,038	810	272	11,288	11,043	28,821
	Muy bajo	347	347	2,217	387	724	183	370	536	376	344

4.2.4 Potencial natural para la agricultura de temporal

El Estado de Puebla posee 34290 km², de los cuales 12700 (37%) se destinan a la agricultura de temporal. Con base en los resultados de nuestro trabajo, 55% del Estado (18860 km²) presenta potencial agrícola ya sea alto o muy alto, mientras que 45% (15430 km²) posee potencial bajo o muy bajo. Los paisajes con potencial alto o muy alto se distribuyen principalmente en el Altiplano Central, las planicies orientales, los valles de Tehuacán y en la Sierra Norte hacia las llanuras costeras del Golfo de México (figura 16).

Analizando el patrón de ocurrencia de paisajes con potencial alto y muy alto en relación a los componentes del paisaje, se encontró que estos coinciden principalmente con geoformas del tipo planicies (DV<40m/km²) con acumulación aluvial de materiales, en donde las propiedades físicoquímicas de los suelos permiten el establecimiento y desarrollo adecuado de las plantas. En lomeríos también se ubicaron potenciales adecuados para la agricultura aunque en menor superficie que las planicies. Le siguieron en importancia los valles fluviales, montañas y planicies onduladas.

Por cuestiones climáticas, los mayores potenciales se localizaron en paisajes con clima templado subhúmedo (incluidos los subtipos Cwo, Cw1 y Cw2, García 1987), seguido de los tipos templado húmedo y cálido húmedo. Al respecto, cabe mencionar que la condición “templada” indica que las variaciones de temperatura durante el ciclo agrícola

de temporal principalmente (marzo-octubre), son menos abruptas respecto a otros regímenes térmicos, mientras que la condición subhúmeda permite que la precipitación normal que se registra cubra el requerimiento mínimo de humedad de los principales cultivos.

Con respecto al relieve, los paisajes con pendientes del terreno menor a 3° son los de mayor potencial, dado que en estas condiciones, el drenaje es adecuado y se asegura que haya una correcta distribución de la humedad sobre la superficie agrícola, disminuyendo la probabilidad de inundaciones con lluvias intensas. Le siguen los paisajes con inclinación entre 10 a 30° y entre 5 a 10°. La figura 17 muestra la superficie abarcada por la integración de los potenciales muy alto y alto en cada componente estructural del paisaje.

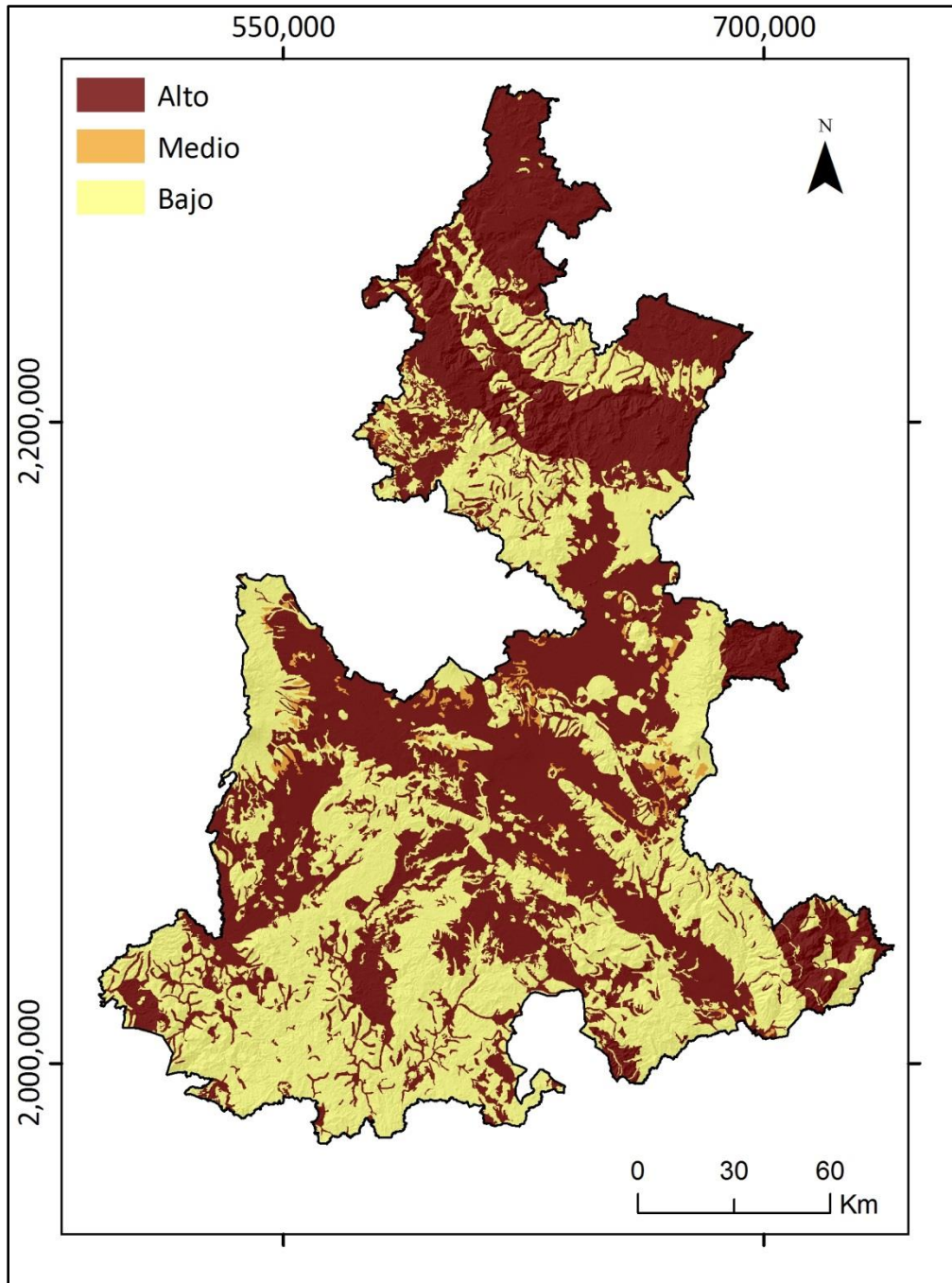


Figura 16. Mapa de potencial general del paisaje para la agricultura de temporal en el Estado de Puebla.
Fuente: Elaboración propia

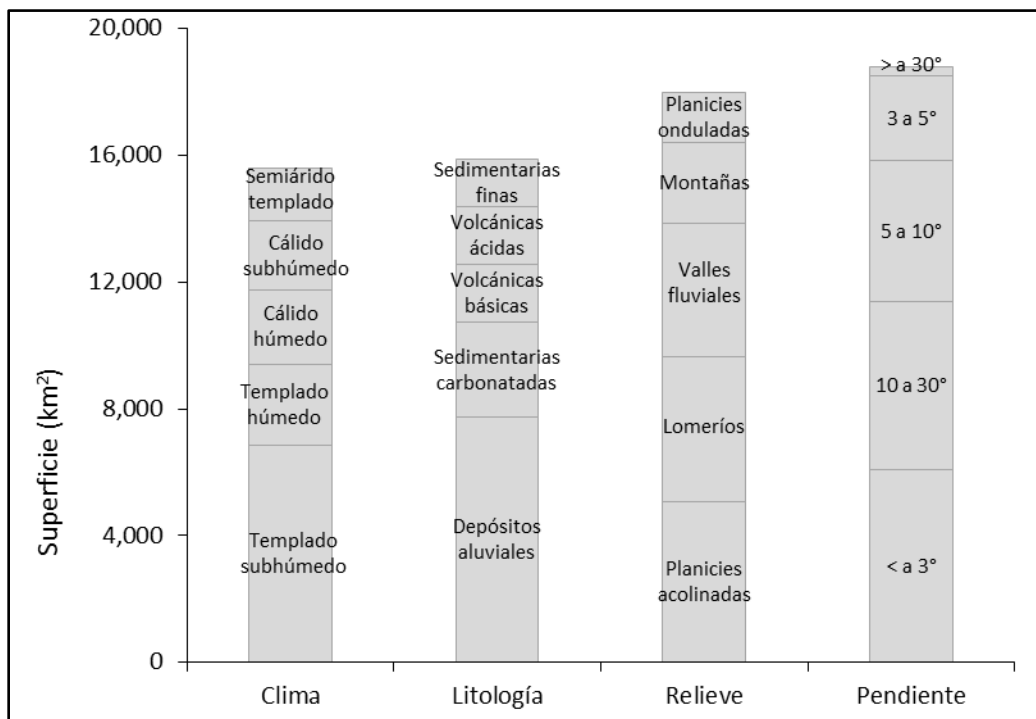


Figura 17. Superficie con potencial natural agrícola adecuado en cada componente estructural del paisaje.
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a un mapa de aptitud agrícola de tierras para el Estado de Puebla (INEGI 2000), aproximadamente 12% del Estado es apto para la agricultura de temporal, lo cual difiere con los resultados encontrados en este trabajo. Esta diferencia probablemente se debe a cuestiones metodológicas, ya que el presente trabajo se centró en analizar el potencial de unidades de paisaje, las cuales son complejos territoriales naturales integradas por componentes físico-geográficos como se especificó en el marco metodológico, mientras que la evaluación de INEGI (2000) se basa en el enfoque del departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA) caracterizado por priorizar el análisis de las propiedades edáficas de la tierra. Otro factor de diferencia puede ser la escala, dado que la delimitación de unidades de paisaje en este trabajo se hizo en la escala regional (1:250 000), lo cual conlleva a generalizar información cartográfica propia de la escala, la cual para el caso de INEGI (2000) no se define en su trabajo.

Si bien no existe concordancia en la magnitud y distribución de todas las zonas con potencial, la delimitación de zonas no aptas para la agricultura sí evidencia un patrón similar. En ambos trabajos se muestran restricciones para la agricultura en la Sierra Norte y

Mixteca Poblana así como en las zonas adyacentes a los volcanes en el oeste y este de Puebla.

4.3 COMPATIBILIDAD AGRÍCOLA DEL PAISAJE

De acuerdo a la evaluación, aproximadamente 2500 km² del Estado (7%) corresponden a paisajes altamente compatibles ya que el uso agrícola es congruente con su potencial, mientras que 11600 km² (34%) son paisajes medianamente compatibles debido a que poseen alto o mediano potencial pero no se les da un uso extensivo agrícola; 4200 km² (12%) son paisajes incompatibles ya que poseen potencial bajo pero se destinan principalmente a la agricultura de temporal.

Conviene advertir que la escala 1:250 000 de la cartografía consultada para la evaluación impide cuantificar la superficie agrícola de polígonos menores a 1 km² (100 hectáreas) de acuerdo al axioma del área mínima cartografiable. De esta manera, la superficie agrícola real en el Estado, podría estar subestimada al no contabilizar la superficie de parcelas al interior de una matriz agrícola-forestal. En este sentido, muy posiblemente la superficie altamente compatible sea mayor que la reportada en este trabajo.

Con respecto a los paisajes incompatibles, el mapa de su distribución indica que estos se localizan principalmente en fragmentos de la Sierra Norte y de la Sierra Negra, al sureste del Estado. Las explicaciones sobre el uso agrícola de paisajes en lugares poco aptos pueden ser diversas. Ya Ruiz-Careaga *et al.* (2004 y 2005) evidenciaron la ocurrencia de graves problemas de erosión del suelo en la Sierra Norte de Puebla como consecuencia del cultivo en laderas fuertemente inclinadas, combinado con suelos fácilmente erosionables y lluvias constantes en el año. Sin embargo, se requiere considerar la existencia de conflictos por el acceso a la tierra, ya que de acuerdo a Ramírez-Juárez (2003), las políticas de distribución de tierras han propiciado en muchos casos el reparto de parcelas de mala calidad, insuficientes para asegurar el abasto de las familias campesinas, obligando a sus propietarios a buscar nuevas tierras en lugares poco

adecuados. Aunado a esto, cada vez es más común la transformación de los sistemas campesinos caracterizados por hacer un uso más conservativo de la tierra, hacia modelos agrícolas de alta rentabilidad pero con un elevado impacto ambiental debido al mayor uso de insumos e implementos agrícolas para labrar el suelo.

Al respecto, se requiere analizar de manera detallada la problemática de la incompatibilidad agrícola. Este mayor detalle incluye tanto la escala cartográfica, como la escala de manifestación de los problemas derivados de la incompatibilidad (parcela, comunidad, municipio, etc). De esta manera, dependiendo del tipo de problema y el grado de afectación, se deberán plantear las estrategias adecuadas para prevenir futuros daños o revertir los existentes.

Para los alcances de este trabajo, se propone replantear el uso del territorio en paisajes incompatibles, seleccionando aquellas actividades que tengan un menor impacto ambiental y que se puedan desarrollar conforme al potencial del paisaje, como los sistemas agroforestales, el uso de cultivos que tengan un mayor potencial en tales áreas o bien evaluar otros posibles usos como el forestal o la conservación del ecosistema en donde se pueden establecer actividades como el turismo de naturaleza.

Se excluyeron del análisis de compatibilidad 16000 km² (47%) dado que en estos, el uso principal del paisaje no es la agricultura de temporal, no obstante algunos paisajes pueden tener alto potencial natural para esta actividad. El uso del paisaje en estos casos es principalmente forestal con diversos niveles de intensidad y en menor proporción se usan para la ganadería extensiva, de acuerdo a la cartografía de vegetación y uso del suelo (Inegi 2013a).

De acuerdo al análisis espacial, los paisajes altamente compatibles se distribuyen hacia el sector este del Estado y en menor medida en el noreste en la colindancia con el Estado de Hidalgo (figura 18); los paisajes medianamente compatibles como ya se discutió, se distribuyen principalmente en el área del altiplano central, así como en la parte norte del Estado en la colindancia con Veracruz.

Con la intención de identificar patrones de asociación espacial entre compatibilidad y componentes del paisaje, se contabilizó por separado, la superficie de los paisajes

compatibles (figura 19), medianamente compatibles (figura 20) e incompatibles (figura 21) en relación a los tipos climáticos, geomorfológicos, litológicos y morfométricos del paisaje. De acuerdo a esto, no se encontró evidencia de mayor compatibilidad en algún tipo climático, ya que tanto paisajes altamente compatibles, como medianamente compatibles e incompatibles, se encuentran en el tipo templado subhúmedo.

No obstante, sí hay mayor presencia de paisajes compatibles y medianamente compatibles en planicies acolinadas respecto a otras geoformas (figuras 31 y 32), mientras que en las montañas se localizan principalmente los paisajes incompatibles (figura 21). En términos litológicos, los paisajes altamente compatibles coinciden con litología volcánica ácida; los medianamente compatibles con depósitos aluviales; los incompatibles en áreas con rocas sedimentarias carbonatadas. Finalmente de acuerdo a la inclinación del terreno, los altamente compatibles se asocian con inclinaciones menores a 3°, mientras que los medianamente compatibles e incompatibles con inclinaciones entre 10 y 30°.

Las coincidencias entre compatibilidad y litología descritas en esta investigación no implican necesariamente una relación causal en el sentido de que un tipo litológico favorezca una mayor o menor compatibilidad, ya que la litología es un componente geográfico azonal, lo que significa que su manifestación no depende de la ubicación geográfica. Caso contrario es el clima el cual si posee distribución determinada por otros elementos geográficos como la latitud. En este sentido, se esperaba encontrar relación de la compatibilidad con clima y con la geomorfología. De acuerdo a los resultados obtenidos, únicamente la geomorfología evidenció la relación. La ausencia de un patrón de asociación entre clima y compatibilidad podría deberse a una situación de escala, dado que la información de tipos climáticos utilizada se definió a escala 1: 1 millón que posee un mayor nivel de generalización geográfica que la escala de evaluación de este trabajo. Como alternativa se plantea el uso de información obtenida de estaciones climáticas para identificar relaciones clima-compatibilidad agrícola, sin embargo la información resultante solo tendrá validez para el área de cobertura de la estación climática.

La superficie abarcada por los paisajes altamente compatibles en relación a los componentes del paisaje analizados de manera individual, se muestra en la figura 19. La

relación entre componentes del paisaje y los paisajes medianamente compatibles e incompatibles se muestra en las figuras 32 y 33 respectivamente.

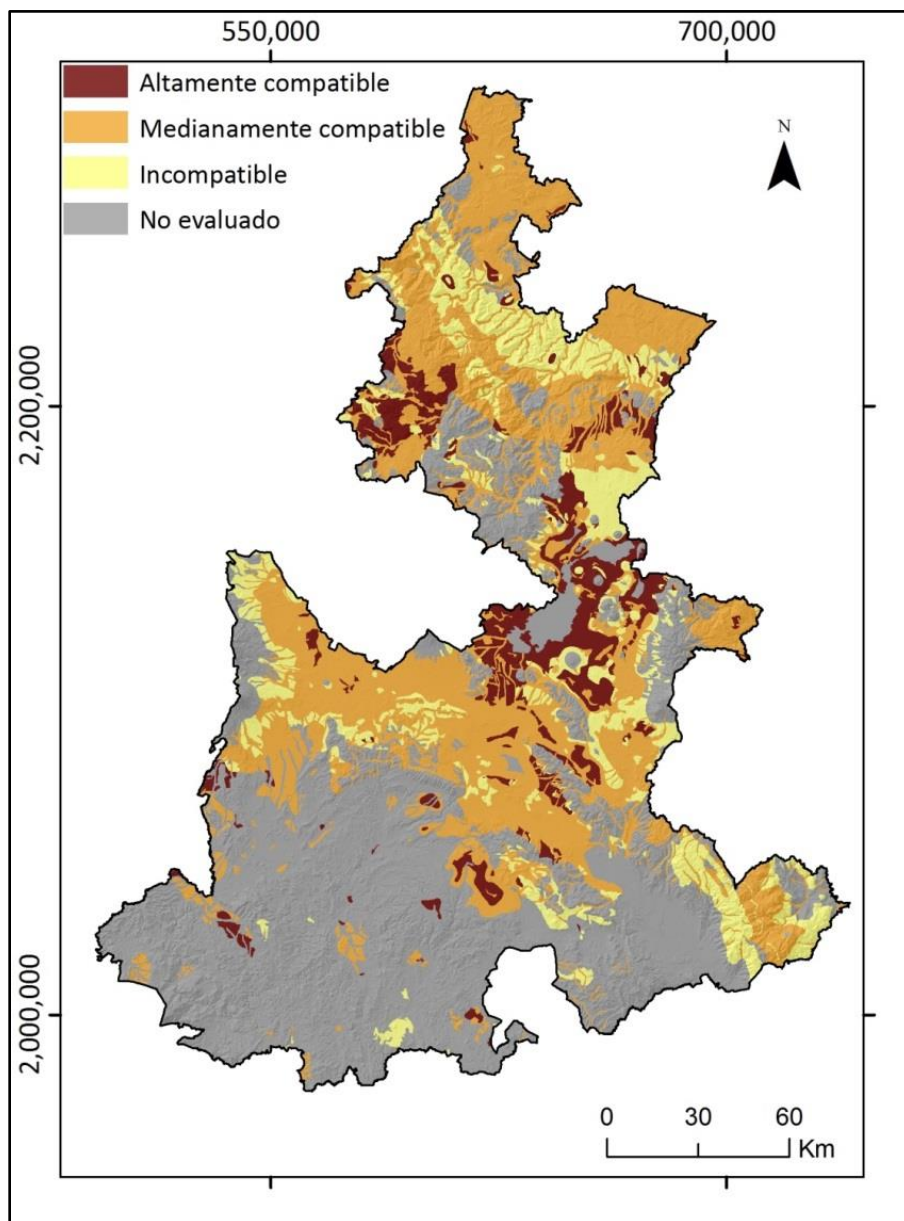


Figura 18. Mapa de distribución de la compatibilidad agrícola de los paisajes de Puebla. Fuente: Elaboración propia

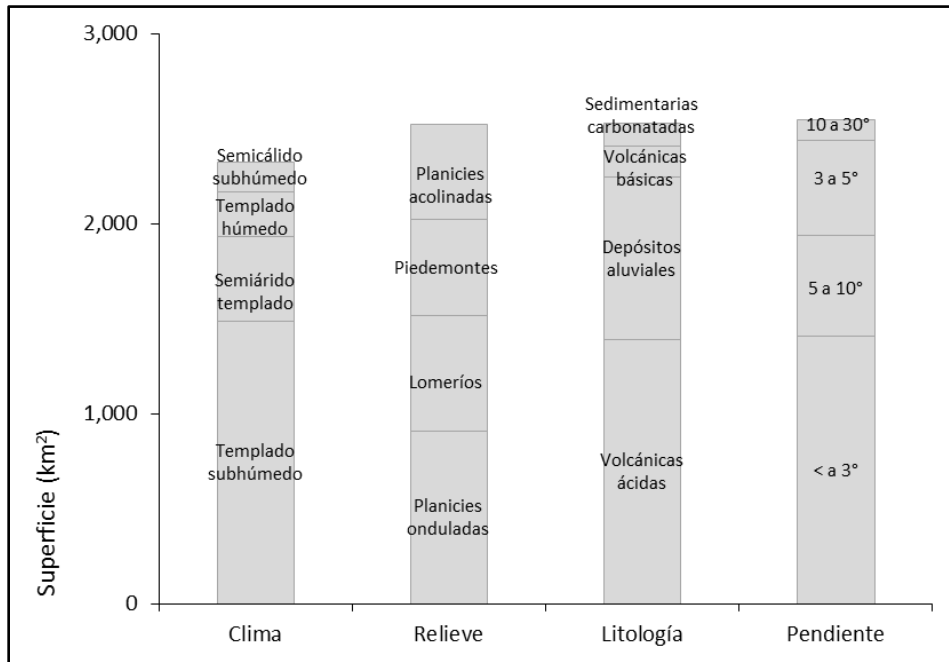


Figura 19. Superficie abarcada por los paisajes altamente compatibles en cada componente específico del paisaje. Fuente: Elaboración propia

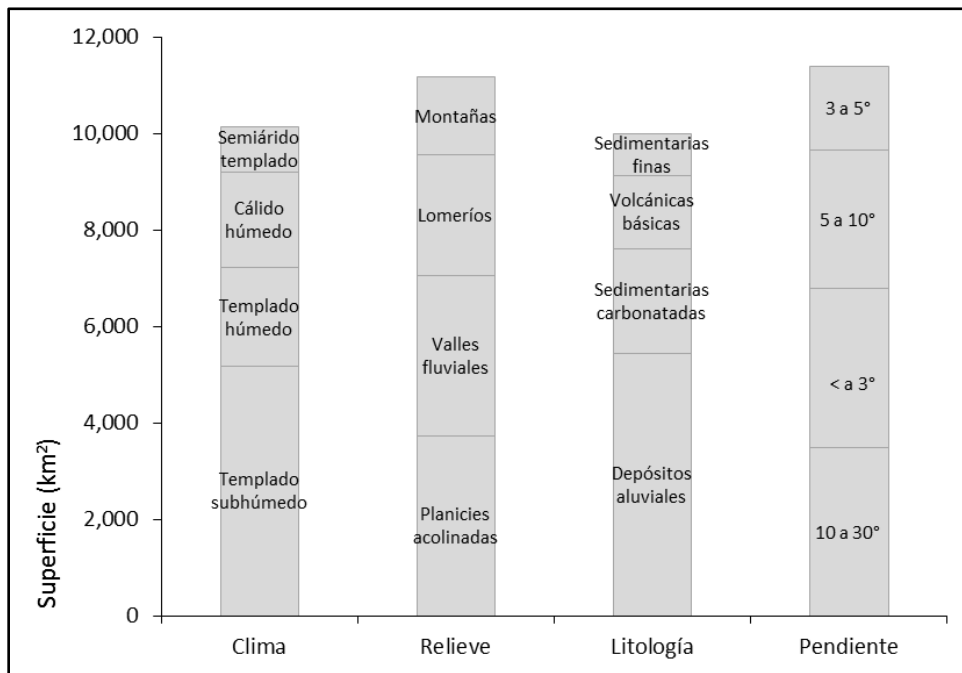


Figura 20. Superficie abarcada por los paisajes medianamente compatibles en cada componente específico del paisaje. Fuente: Elaboración propia

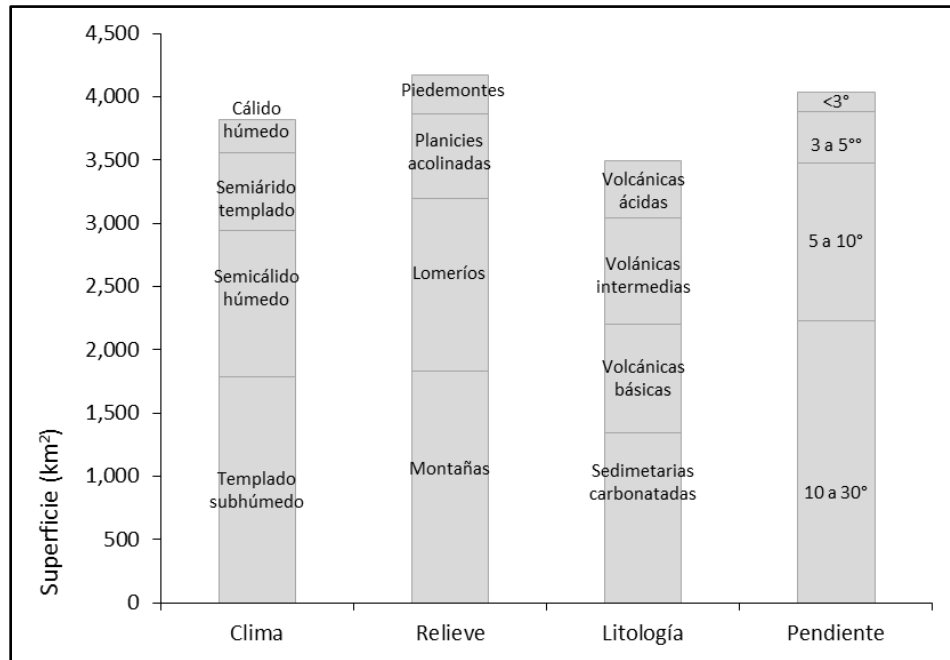


Figura 21. Superficie abarcada por los paisajes incompatibles en cada componente específico del paisaje.
Fuente: Elaboración propia

4.4 ESTADO AMBIENTAL

El Estado Ambiental se determinó, evaluando separadamente el grado de ocurrencia de problemas ambientales y la estabilidad funcional del paisaje, para finalmente integrar los resultados en un valor de Estado Ambiental.

4.4.1 Problemas ambientales

Degradación del suelo

Con base en los resultados de este trabajo, únicamente 43 km² (0.1%, 6 unidades) correspondieron a paisajes con muy alta degradación del suelo; mientras que 6600 km² (19%, 61 unidades) tienen alta degradación; 8190 km² (24%, 66 unidades) son medianamente degradados; 10800 km² (31%, 76 unidades) con baja degradación y 8700 km² (25%, 82 unidades) tienen muy baja degradación del suelo. Esto implica que casi 60% del área estatal son paisajes con baja y muy baja degradación del suelo evidenciado en la

relativa poca erosión. Estos paisajes se localizan principalmente en sectores de la Sierra Norte y al suroeste del Estado. Por otro lado, 19% corresponde a paisajes con alta y muy alta degradación, que se distribuyen en el centro del Estado coincidiendo espacialmente con la principal zona agrícola del Estado. La figura 22 muestra el mapa de distribución de las categorías de degradación del suelo.

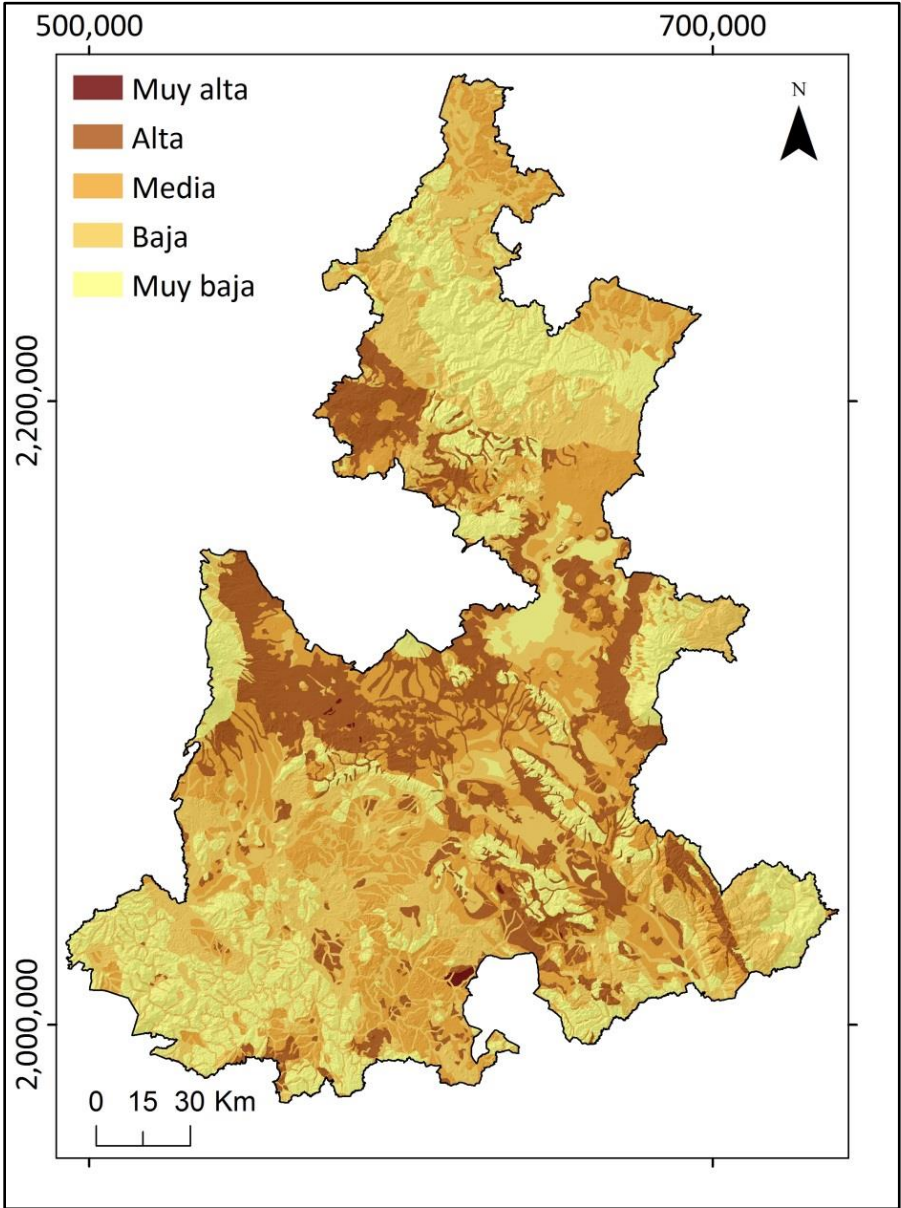


Figura 22. Mapa de degradación del suelo. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2013b, 2014b)

El Índice de Degradación del Suelo permitió estimar cuantitativamente la degradación del suelo, integrando los tipos de erosión del suelo y su nivel de intensidad en un solo valor numérico, sin embargo conviene advertir algunas particularidades metodológicas que se deben considerar al interpretar el índice. Una unidad de paisaje, puede contener polígonos de diferentes tipos y grados de erosión con su respectivo valor de área. Así, este índice representa la sumatoria de todos los tipos de degradación, sin embargo una misma unidad de paisaje podría contener los tipos “Sin erosión” y “Erosión extrema”.

Con el propósito de identificar los tipos dominantes en cada categoría de degradación del suelo, se contabilizó y representó gráficamente la superficie de cada tipo de erosión. De esta manera se podrá hacer una mejor planeación de las acciones requeridas para revertir la degradación del suelo.

Con base en este análisis, se encontró que todas las categorías de degradación se integran por diversos tipos e intensidades de erosión, pero siempre hay dominancia de un tipo al interior. La figura 23 representa gráficamente la superficie en cada categoría de degradación y la proporción de los tipos de erosión al interior.

Se observa que en los paisajes con degradación muy alta dominan los tipos “Erosión extrema” y “Erosión antrópica”, mientras que en los de degradación muy baja dominan los tipos “Sin erosión” y “Erosión leve”.

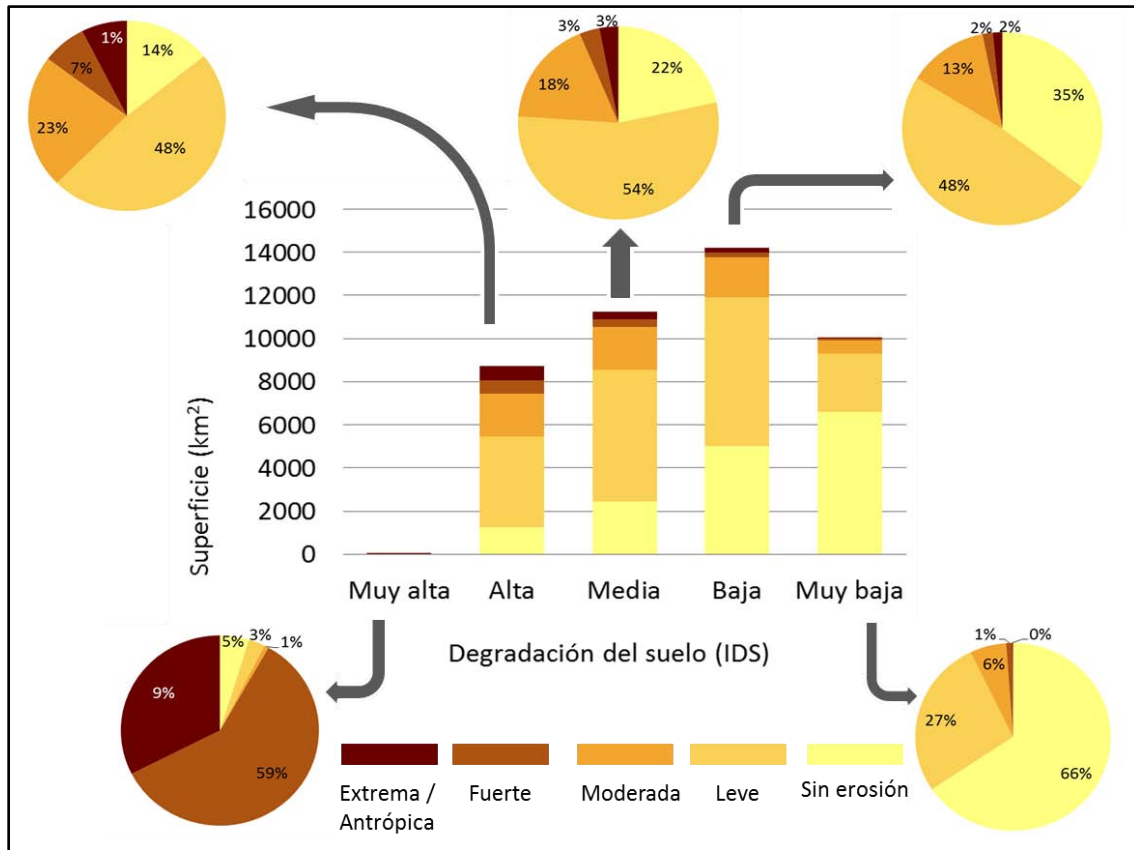


Figura 23. Gráfica de degradación del suelo donde se muestra para cada categoría de degradación la proporción que corresponde a los tipos de erosión. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2013b, 2014b)

Antropización de la cobertura vegetal del suelo

Este indicador representa el grado de transformación de los tipos de cobertura vegetal natural que han sido reemplazados por otro tipo de vegetación cultural o uso del suelo. Los resultados mostraron que 5200 km² (15%, 64 unidades) son paisajes con muy alta antropización de la cobertura vegetal, 6800 km² (20%, 48) corresponden a paisajes con alta antropización, 7500 km² (22%, 51) son medianamente antropizados, 14000 km² (41%, 92) se clasificaron con antropización baja y solamente 760 km² (2%, 36) son paisajes con muy baja antropización. Respecto a la distribución espacial, los paisajes con alta y muy alta antropización de la cobertura vegetal se concentran principalmente en el altiplano central y en las zonas agrícolas de las planicies de Izucar de Matamoros en el oeste y el

valle de Tehuacán en el este. En las serranías del norte y sur, la cobertura vegetal del suelo mantiene bajos niveles de antropización (figura 24).

Al igual que el cálculo de degradación del suelo, una unidad de paisaje puede contener polígonos con diferentes grados de antropización, los cuales se ponderan de acuerdo a su área. Para el análisis de los tipos de cobertura vegetal dominantes en cada categoría de antropización, la categoría “Vegetación conservada” incluyó los bosques, selvas y matorrales-pastizales en estado original o secundaria pero con elementos arbóreos; la categoría “Vegetación degradada o inducida” abarcó los mismos tipos de vegetación que la anterior pero con fase sucesional arbustiva, además de bosques cultivados y palmar inducido; la categoría “Agricultura permanente/Vegetación muy degradada” integró polígonos con agricultura de riego o temporal que tienen cultivos permanentes o semipermanentes, así como los tipos de vegetación forestal o matorral-chaparral que se encuentran en fase sucesional herbácea; la categoría “Agricultura anual” incluye polígonos con agricultura de riego o temporal que se siembran cada año; finalmente la categoría “Sin vegetación/Uso urbano” incluye polígonos de áreas sin vegetación aparente, asentamientos humanos o zonas urbanas. Los tipos de cobertura vegetal del suelo corresponden a los presentes en la cartografía de vegetación y uso del suelo (INEGI 2013a). La proporción de cada categoría de vegetación-uso al interior de los tipos de antropización se muestra en la figura 25.

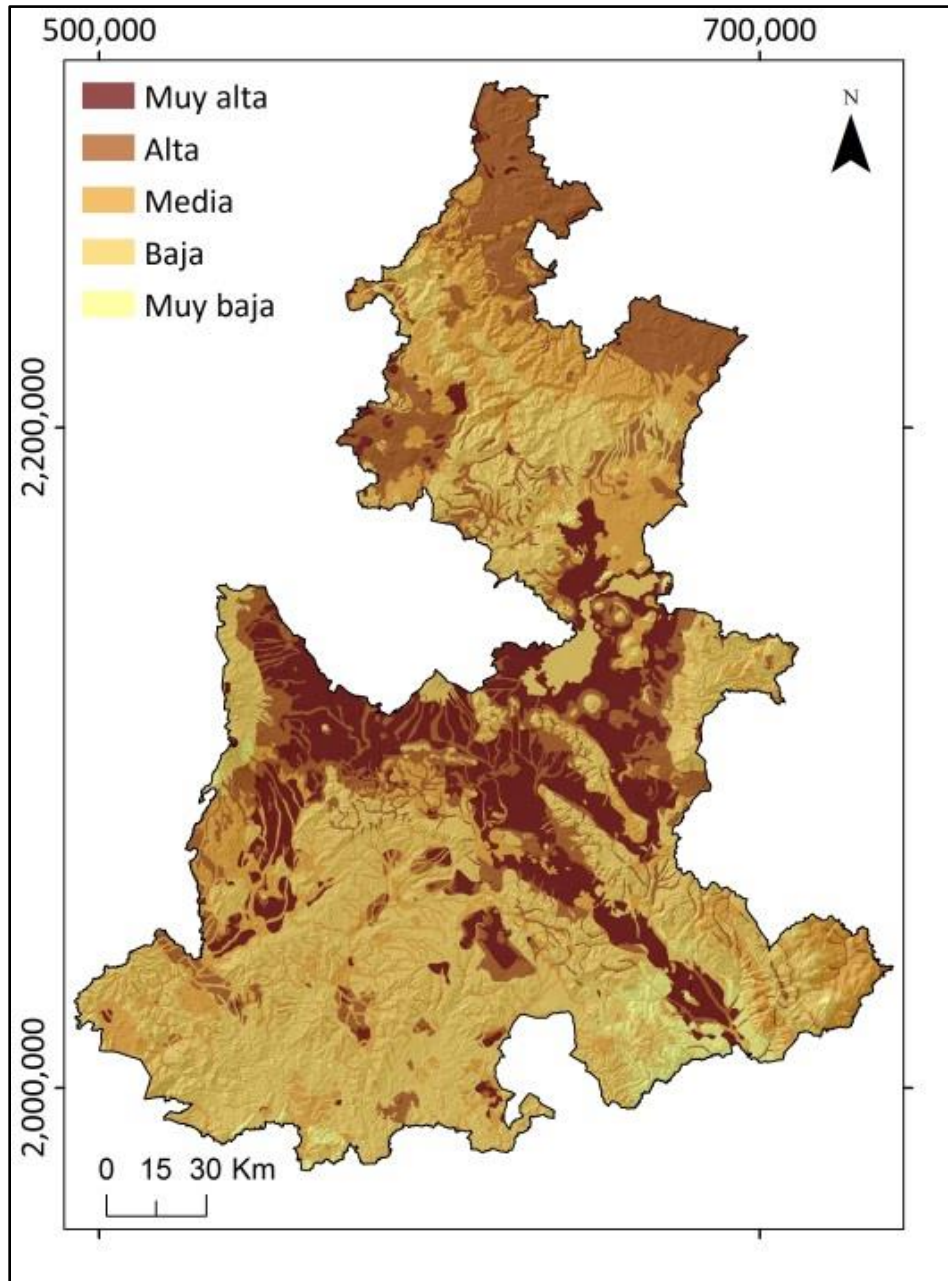


Figura 24. Mapa de distribución de las categorías de antropización de la cobertura vegetal del suelo. Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2013a)

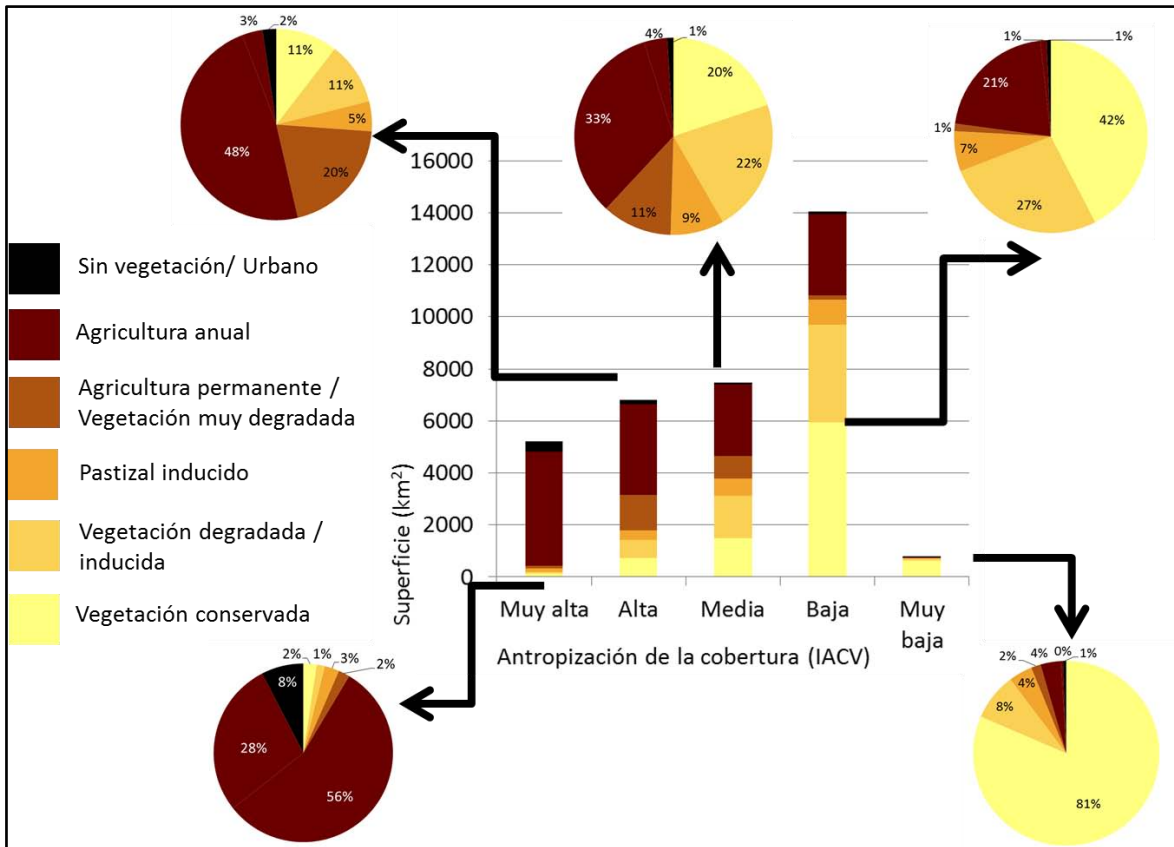


Figura 25. Categorías de antropización de la cobertura vegetal del suelo y proporción de cada tipo de vegetación-uso del suelo al interior. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2013a).

4.4.2 Evaluación de la Estabilidad Funcional del Paisaje

Esta etapa consistió en realizar evaluaciones parciales de la geodiversidad, biodiversidad y la fragilidad del paisaje, los cuales se integraron en un valor de Estabilidad Funcional del Paisaje.

Geodiversidad o heterogeneidad geocológica

El indicador Riqueza de paisajes (R) fue el que mejor representó la heterogeneidad ya que casi 5000 km² (14% del área) se clasificaron con riqueza Muy Alta y 15000 km² (44%) con Alta, (figura 26c). Sumando la superficie de Muy Alta y Alta, ambas abarcan cerca de 60% del total estatal, que puede ser considerado como de altamente heterogéneo. Los demás indicadores representaron la heterogeneidad de manera marginal ya que de acuerdo a la

diversidad de paisajes, 2500 km² (7%) se clasificaron como Muy Alta y 4700 (14%) con Alta; por Complejidad Tipológica, 1600 km² (5%) y 4900 (14%) correspondieron a Muy Alta y Alta respectivamente; la Complejidad Corológica tuvo los valores de heterogeneidad más bajos ya que únicamente 240 km² (1%) y 2900 (8%) se clasificaron como Muy Alta y Alta respectivamente. La superficie de los indicadores de geodiversidad por categoría se muestra en la figura 26.

Es conveniente detallar que la Riqueza de paisajes representa la abundancia de subunidades en una unidad de paisaje, de tal manera que a mayor número de subunidades en la unidad le corresponde mayor riqueza. A su vez, la abundancia de subunidades está determinada por la presencia de un gradiente amplio de inclinación del terreno. De esta manera, los paisajes con mayor riqueza son aquellos que incluyen una mayor cantidad de categorías de inclinación del terreno, los cuales abarcan más de 60% del Estado de Puebla. Esta característica se debe tener en cuenta para planificar y asignar usos del territorio compatibles con el relieve.

De acuerdo a Priego-Santander *et al.* (2003, 2004, 2013), la heterogeneidad del paisaje y la biodiversidad están altamente relacionadas, siendo esta relación más evidente en áreas geográficas pequeñas. Por su parte Nichols *et al.* (1998), Hofer *et al.* (2008) y Kumar *et al.* (2006) coinciden en que la heterogeneidad del paisaje refleja una elevada complejidad biofísica. Los resultados encontrados en el Estado de Puebla, son congruentes con tales investigaciones, ya que la alta riqueza de paisajes representa su alta complejidad geográfica, evidenciada en las formaciones montañosas que abarcan más de la mitad del territorio estatal, la diversidad de tipos litológicos (volcánicos, sedimentarios, metamórficos) y materiales aluviales y lacustres; el amplio gradiente climático en términos del régimen térmico y de humedad (INEGI 2000, Flores-Domínguez *et al.* 2014a) y los rangos amplios de inclinación del terreno.

En investigaciones similares, se ha mencionado que diferentes indicadores pueden explicar la heterogeneidad en diferentes áreas, pero no hay uno que sea de aplicación universal. Debido a esto, se requiere explorar en diversas regiones el desempeño de varios

indicadores a fin de lograr obtener patrones geográficos en diferentes ecosistemas (Símová y Gdulová 2012).

Una característica interesante observada es que 7200 km² de los 20,000 con la mayor Riqueza de paisajes, coincidieron espacialmente con los de mayor Diversidad de paisajes. El patrón de asociación entre Riqueza de paisajes - Diversidad de paisajes fue más evidente que entre otros indicadores de geodiversidad. Como ejemplo, la asociación entre Riqueza y Complejidad Tipológica incluyó 6500 km², mientras que Riqueza con Complejidad Corológica solo incluyó 1900 km². Adicionalmente se observó que siete unidades de las 291 tuvieron valores altos de Riqueza, Diversidad y Complejidad Tipológica de manera similar. Estas unidades abarcan aproximadamente 20% del Estado y corresponden principalmente a valles fluviales formados por depósitos aluviales en clima templado subhúmedo, con distribución en el centro y sur del Estado. Los mapas de Geodiversidad se muestran en la figura 26.

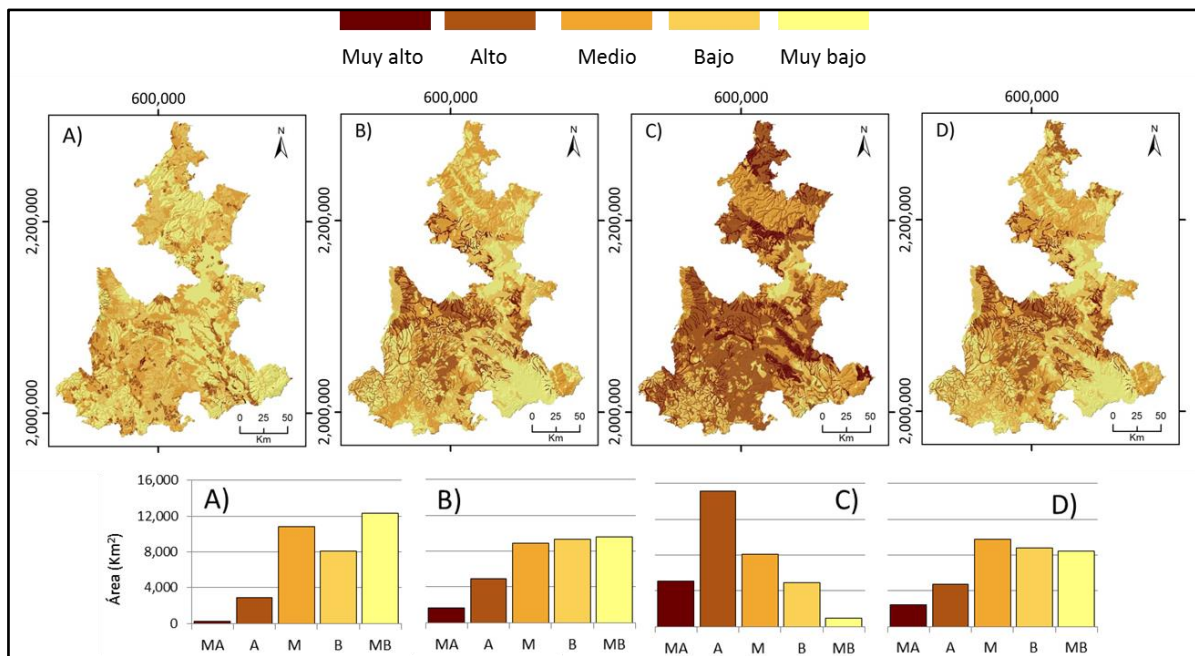


Figura 26. Mapas y gráficas de la superficie para indicadores de geodiversidad y área de cada categoría. A) Complejidad corológica, B) complejidad tipológica, C) riqueza de paisajes, D) diversidad de paisajes. Fuente: Elaboración propia

Analizando el patrón de heterogeneidad por componente del paisaje, se encontró que los lomeríos (geformas donde la disección vertical varía entre 40 a 100m/km²) y valles fluviales son las geformas donde se encontró una mayor Riqueza del paisaje. Respecto a la litología- material del subsuelo, las zonas con depósitos aluviales poseen mayor Riqueza de paisajes que las unidades con litología sedimentaria, volcánica o metamórfica. De los tipos climáticos, las zonas templadas subhúmedas poseen la mayor Riqueza del paisaje de todos los tipos climáticos. Mientras que debido a la inclinación del terreno, la mayor Riqueza de paisajes se concentra en zonas con pendiente entre 10 y 30°, seguido del intervalo 5 a 10° que se extienden en 21 y 19% de la superficie estatal respectivamente. Las gráficas de relación entre componentes del paisaje y geodiversidad se muestran en la figura 27.

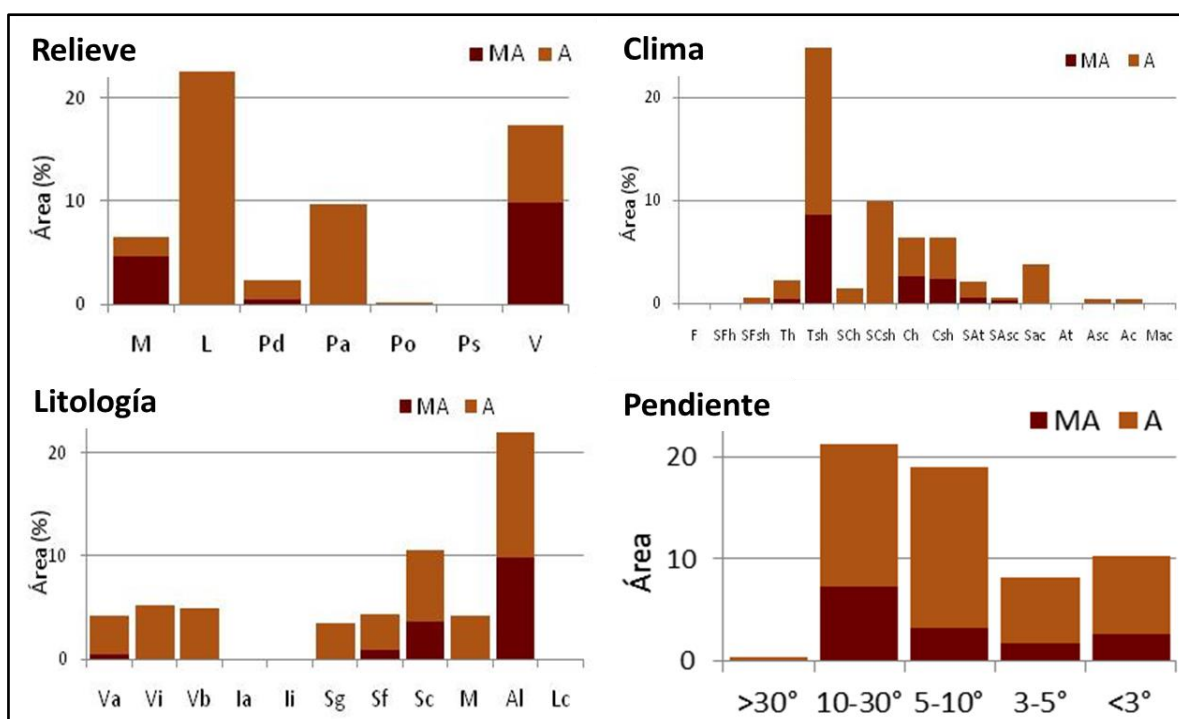


Figura 27. Patrón de riqueza de paisajes en relación a los componentes del paisaje. Abreviaturas relieve: M: montañas, L: lomeríos, Pd: piedemontes, Pa: planicies acolinadas, Po: planicies onduladas, Ps: planicies subhorizontales, V: valles. Abreviaturas clima: F: frío, T: templado, C: cálido, A: árido, S: semi, M: muy, h: húmedo, sh: subhúmedo, t: templado, sc: semicálido, c: cálido. Abreviaturas litología: Va: volcánica ácida, Vi: volcánica intermedia, Vb: volcánica básica, Ia: intrusiva ácida, Ii: Intrusiva intermedia, Sg: sedimentaria gruesa, Sf: sedimentaria fina, Sc: sedimentaria carbonatada, M: metamórfica, Al: depósitos aluviales, Lc: depósitos lacustres. Fuente: Elaboración propia

Biodiversidad

Conforme a los datos del Sistema Nacional de Información Biológica, en el Estado de Puebla existen 1029 registros de especies de fauna y 7026 de plantas. Las especies de fauna se agrupan en 134 familias, siendo las mejor representadas: Cricetidae (ratones, 47 especies), Tyrannidae (pájaros mosqueros, 45), Emberizidae (gorriones americanos, 39), Parulidae (pájaros chipes, 38), Colubridae (culebras, 34), Trochilidae (colibríes, 31), Dipsadidae (serpientes parecidas a las culebras, 29), Phyllostomidae (familia de murciélagos, 27), Vespertilionidae (familia de murciélagos, 25), Icteridae (pájaros zanates y tordos americanos, 25), Hylidae (ranas arborícolas, 25), Phrynosomatidae (lagartijas espinosas, 24), Plethodontidae (salamandras, 23) y Cardinalidae (pájaros cardenales, 20). Las familias restantes poseen menos de 20 especies. El grupo mejor representado son las aves (534 especies), seguido de mamíferos (180), reptiles (178), anfibios (93) y peces (44).

Respecto a la flora, las especies se agrupan en 317 familias, de las cuales las mejor representadas son Asteraceae (plantas con flores compuestas, 793 especies), Leguminosae (plantas que dan frutos en forma de vaina, 593), Poaceae (pastos, 472), Euphorbiaceae (plantas con latex, 201), Lamiaceae (plantas con los pétalos en forma de labios, 186), Orchidaceae (orquídeas, 171), Solanaceae (plantas con frutos del tipo del tomate o chile, 161), Malvaceae (malvas, 155), Rubiaceae (plantas del tipo del café, 145), Apocynaceae (132), Cactaceae (cactus, 122) y Pottiaceae (musgos, 101).

Se analizó la correlación entre indicadores de geodiversidad y de biodiversidad mediante el coeficiente R^2 . La mayor correlación correspondió a Diversidad de paisajes con riqueza de flora ($R^2 = 0.58$) y riqueza de fauna silvestre ($R^2 = 0.57$) (cuadro 13 y figura 28), mientras que la Complejidad Tipológica tuvo ligeramente menor correlación con las mismas variables de biodiversidad ($R^2 = 0.55$ y 0.54 respectivamente).

A partir de estos resultados, se decidió utilizar las variables Complejidad Tipológica, Diversidad de paisajes, riqueza de flora y riqueza de fauna, para integrarlas en un indicador de Biogeodiversidad. Este indicador consta de las cinco categorías utilizadas anteriormente, formadas mediante el análisis de conglomerados por K-medias. Las

categorías de biogeodiversidad se muestran y describen en el cuadro 14. El mapa de biogeodiversidad se muestra en la figura 29, observándose que los paisajes con muy alta biogeodiversidad se distribuyen principalmente en las cercanías de los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl al oeste del Estado, así como en el altiplano central, además de algunos sectores en la Sierra Norte y pequeñas áreas en la Sierra Negra al sureste. Las planicies del este y la Mixteca Poblana poseen los paisajes con valores de Biogeodiversidad más bajos.

Cuadro 13. Coeficiente de correlación (R^2) entre atributos de Geodiversidad-singularidad con indicadores de biodiversidad. Abreviaturas: CC: Complejidad Corológica, CT: Complejidad Tipológica, R: Riqueza de paisajes, U: Diversidad de paisajes. Fuente: Elaboración propia con datos del SNIB CONABIO y SEMARNAT (2010). Se resaltan en negrita los valores de R^2 significativos.

Biodiversidad	Geodiversidad				Singularidad S
	CC	CT	R	U	
Riqueza de Fauna	0.11	0.54	0.21	0.57	0.56
Endémica	0.11	0.41	0.13	0.43	0.41
Amenazada	0.10	0.35	0.12	0.39	0.36
En peligro de extinción	0.01	0.22	0.04	0.23	0.25
Sujetas a protección especial	0.10	0.37	0.12	0.37	0.36
No endémica	0.11	0.53	0.21	0.57	0.56
Amenazada	0.08	0.41	0.13	0.41	0.40
En peligro de extinción	0.13	0.01	0.11	0.00	0.00
Sujetas a protección especial	0.10	0.39	0.18	0.42	0.41
En ninguna categoría de la norma	0.11	0.53	0.21	0.57	0.56
Riqueza de Flora	0.11	0.55	0.19	0.58	0.57
Endémica	0.02	0.04	0.05	0.05	0.05
Amenazada	0.10	0.02	0.00	0.03	0.02
Extinta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
En peligro de extinción	0.03	0.00	0.05	0.00	0.01
Sujetas a protección especial	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
No endémica	0.11	0.56	0.19	0.58	0.57
Amenazada	0.01	0.15	0.08	0.15	0.15
En peligro de extinción	0.06	0.00	0.07	0.00	0.00
Sujetas a protección especial	0.05	0.25	0.09	0.25	0.24
En ninguna categoría de la norma	0.11	0.56	0.19	0.58	0.57

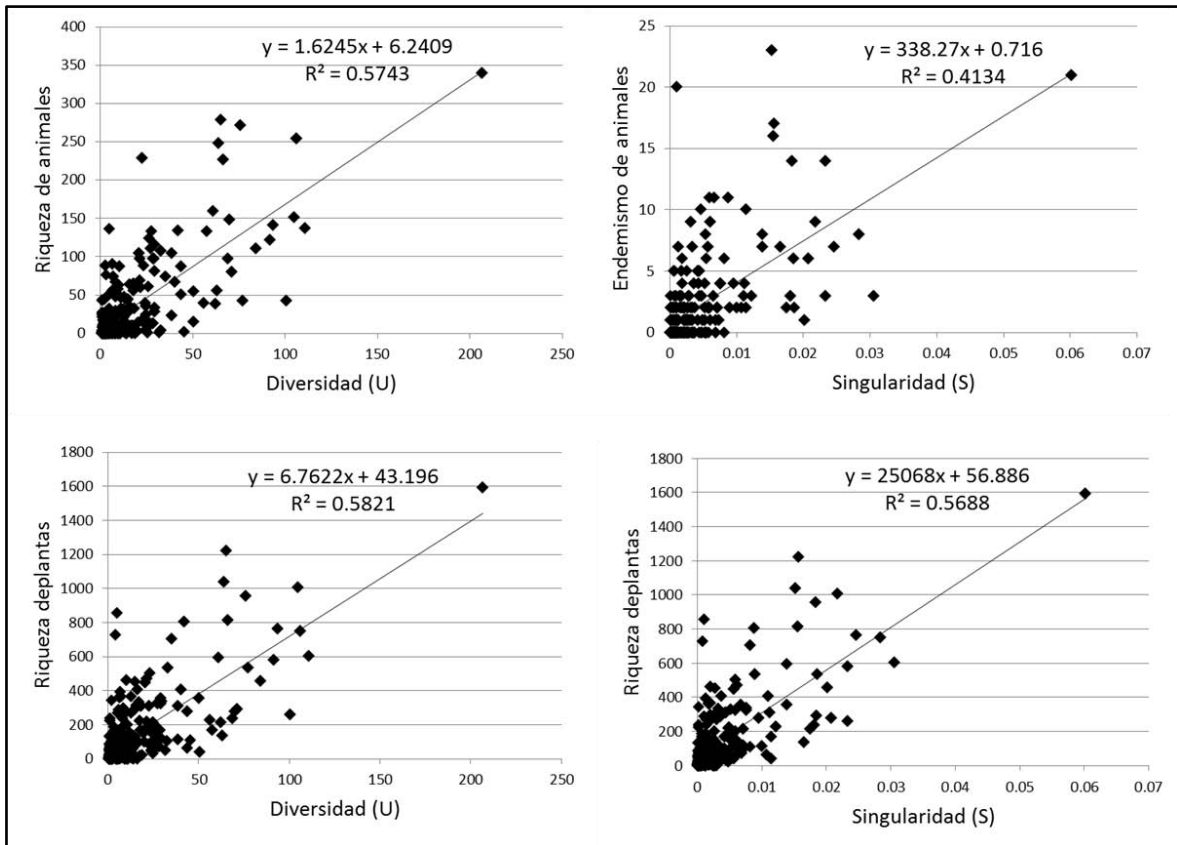


Figura 28. Gráficos de dispersión entre variables correlacionadas de geodiversidad-fragilidad y biodiversidad. Fuente: Elaboración propia

Cuadro 14. Categorías de Biogeodiversidad y conformación de las variables que las definen. Fuente: Elaboración propia.

Biogeodiversidad	Complejidad Tipológica (CT)	Diversidad de paisajes (U)	Riqueza de fauna	Riqueza de flora	Superficie		Número de unidades
					(km ²)	%	
Muy alta	Muy alta y Alta	Muy alta y Alta	Muy alta y Alta	Muy alta y Alta	11,693	34	14
Alta	Muy alta y Alta	Muy alta y Alta	Media	Media	5,376	16	10
Media	Baja	Baja	Media	Media	7,160	21	39
Baja	Baja	Media	Muy Baja	Muy Baja	5,886	17	44
Muy baja	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja	4,180	12	184

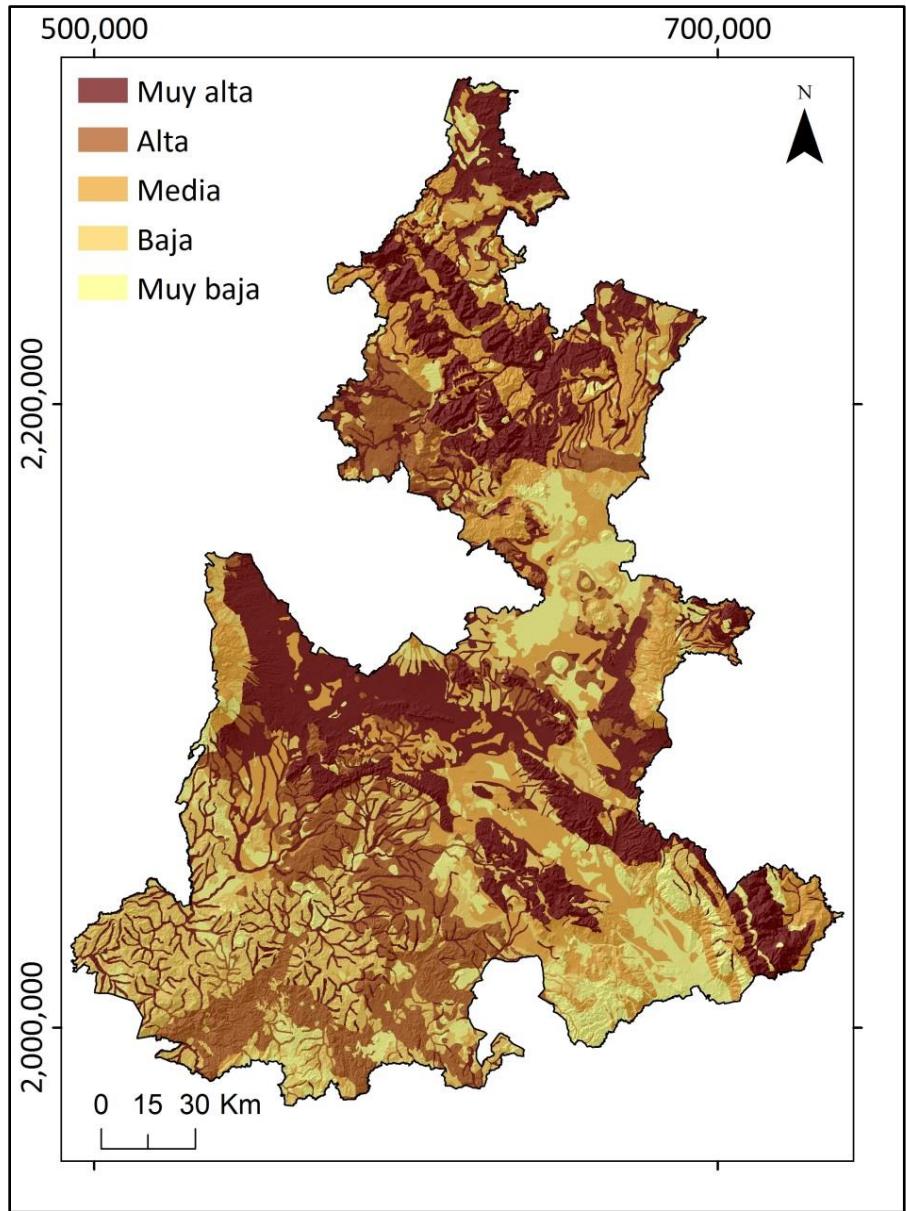


Figura 29. Mapa de biogeodiversidad. Fuente: Elaboración propia

Fragilidad del paisaje

El análisis de la Fragilidad del paisaje implicó caracterizar por separado la singularidad del paisaje y la presencia de especies endémicas, ya que ambas variables se consideraron claves. El uso de estas dos variables obedece a que aquellos paisajes que sean altamente singulares y además tengan presencia de especies endémicas, poseen características físico-geográficas muy particulares que posibilitan la existencia de estos organismos

altamente dependientes de su hábitat para su supervivencia y reproducción. Por tanto, se considera que ante algún factor de disturbio, la permanencia de estas especies, así como el funcionamiento del ecosistema serán altamente afectados.

De la evaluación de singularidad del paisaje, se observó que 13000 km² (38%) poseen Muy Alta singularidad (MA) y 6000 km² (18%) Alta (A). Dado que el valor de singularidad es mayor conforme el número de polígonos en una unidad disminuye, se considera que 56% de la superficie estatal está representada por paisajes singulares o raros, en donde el número de polígonos de su interior es marcadamente menor al resto de los paisajes del Estado.

Se encontró además que los paisajes con Singularidad Alta poseen también Riqueza de paisajes Alta. Esta relación aparentemente contradictoria, es posible ya que metodológicamente, la Riqueza de paisaje representa la cantidad de subunidades presentes en una unidad superior, mientras que la Singularidad se calcula con base en el número de polígonos. De esta manera, se encontraron 56 unidades de paisaje (7000 km², 20% del Estado) donde coinciden valores altos de Singularidad y Riqueza de paisajes.

Se hizo además un análisis de la singularidad observada en cada componente del paisaje, resultando que las montañas (unidades con disección vertical > 100m/km²) son las geoformas que poseen mayor Singularidad; no se encontró evidencia de mayor o menor Singularidad asociada a un tipo litológico o climático particular. Sin embargo, por la pendiente del terreno, el rango entre 10 a 30° es donde se observa la mayor Singularidad y esta ocurre en 26% del Estado.

Los paisajes donde coinciden alta Riqueza de paisajes y Singularidad, se localizan principalmente a lomeríos con litología volcánica independientemente del tipo climático. Estos resultados pueden incorporarse como elementos para la priorización de zonas en trabajos que tenga como meta, la planificación de estrategias de protección y conservación de la geodiversidad del paisaje en el Estado de Puebla.

Las gráficas de relación entre Singularidad y componentes del paisaje se muestran en la figura 30. El mapa de distribución de la Singularidad del paisaje se muestra en la figura 31a.

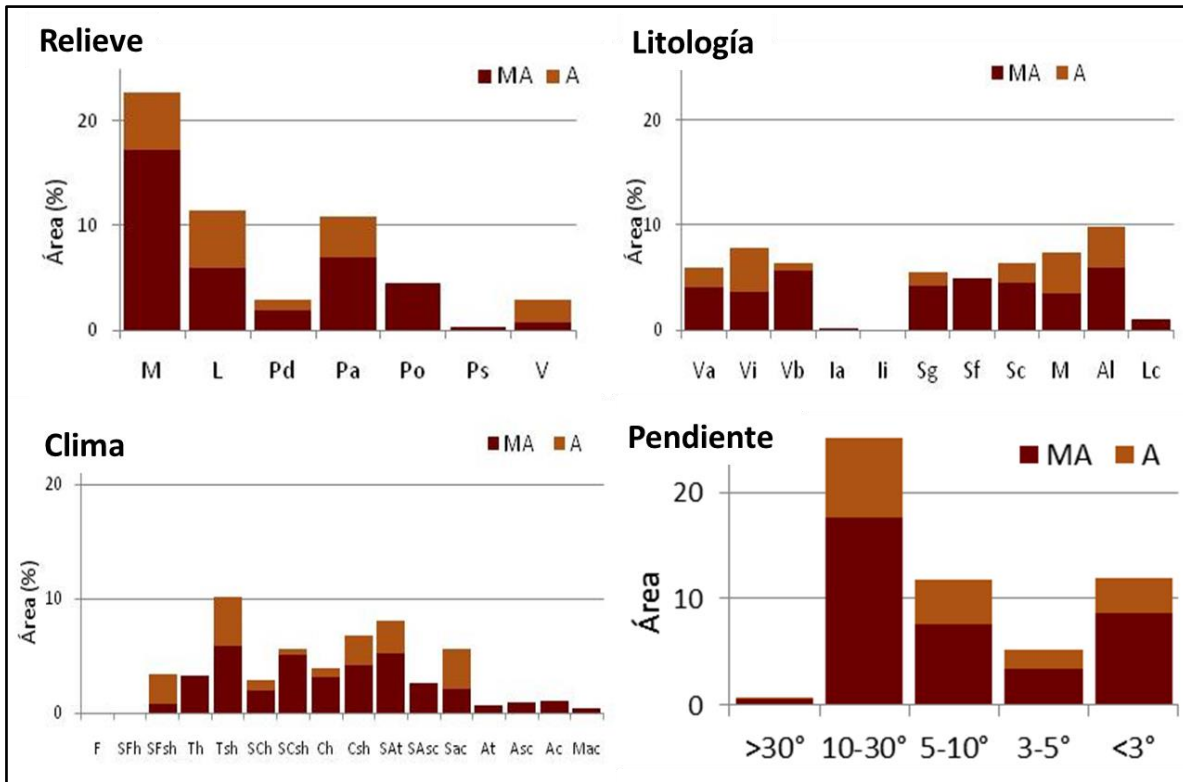


Figura 30. Patrón de Singularidad de paisajes en relación a los componentes del paisaje. Abreviaturas relieve: M: montañas, L: lomeríos, Pd: piedemontes, Pa: planicies acolinadas, Po: planicies onduladas, Ps: planicies subhorizontales, V: valles. Abreviaturas litología: Va: volcánica ácida, Vi: volcánica intermedia, Vb: volcánica básica, Ia: intrusiva ácida, Ii: Intrusiva intermedia, Sg: sedimentaria gruesa, Sf: sedimentaria fina, Sc: sedimentaria carbonatada, M: metamórfica, Al: depósitos aluviales, Lc: depósitos lacustres. Abreviaturas clima: F: frío, T: templado, C: cálido, A: árido, S: semi, M: muy, h: húmedo, sh: subhúmedo, t: templado, sc: semicálido, c: cálido. Fuente: Elaboración propia

Respecto a la presencia de especies endémicas en Puebla, existen registros de 91 especies animales. De este total, 33 especies se consideran amenazadas, seis en peligro de extinción y 52 sujetas a protección especial (SEMARNAT 2010). La mayoría de estas especies habitan montañas de los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl al este de Puebla, así como en la Sierra del Tenzto en el centro del Estado, las cuales se encuentran decretadas como áreas naturales protegidas. Otra proporción importante de endemismos se encuentra en la Sierra Norte, así como al sur en la región de Tehuacán (figura 31b).

De las especies endémicas de flora, se tienen registros de 46 especies, de las cuales 17 están amenazadas, una está probablemente extinta, 10 en peligro de extinción y 18 sujetas a protección especial. La mayor cantidad de endemismos de flora se localiza en la región de Tehuacán, así como en sectores de la Sierra Norte (figura 31c).

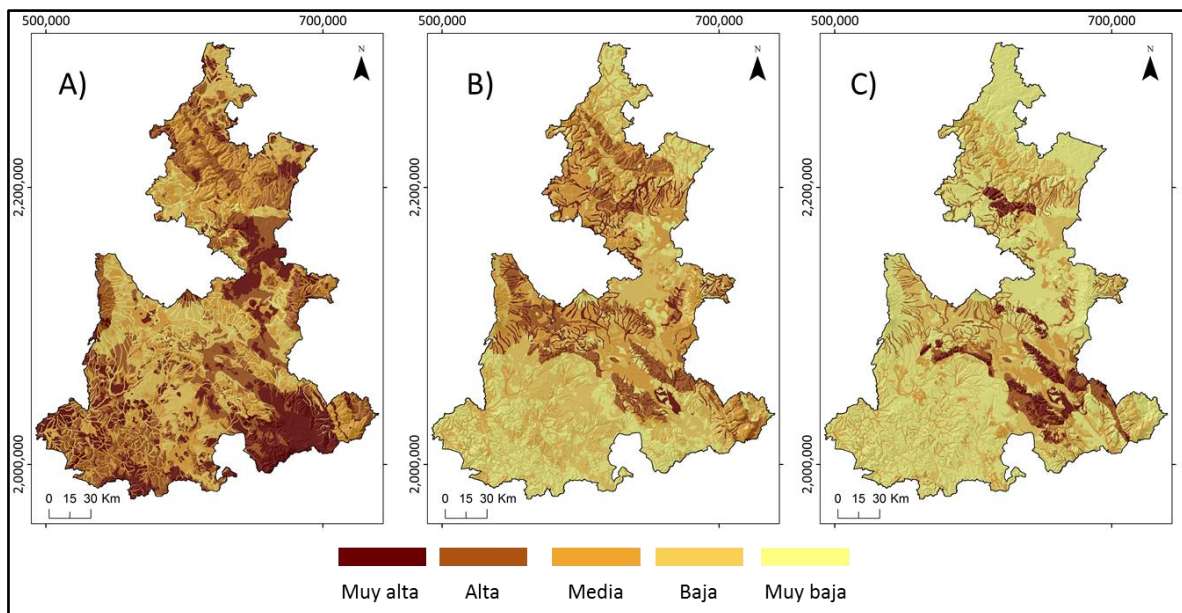


Figura 31. Mapas de distribución de A) singularidad del paisaje, B) presencia de endemismos de fauna y C) presencia de endemismos de flora. Fuente: Elaboración propia con base en SEMARNAT (2010) y el SNIB CONABIO

Finalmente, los indicadores Singularidad del paisaje y la presencia de endemismos se integraron en un indicador de Fragilidad del Paisaje. No obstante es importante mencionar que los resultados de la correlación mostraron que los valores de Alta Singularidad no se asocian con la Alta presencia de endemismos de fauna ($R^2= 0.41$) ni de flora ($R^2= 0.05$, cuadro 13). Por tal motivo, se decidió analizar la Fragilidad del paisaje, integrando la Singularidad del paisaje con la presencia de endemismos de fauna, ya que su correlación fue mayor que entre Singularidad – endemismos de flora. Los valores de Fragilidad se agruparon en cinco intervalos-categorías, mediante análisis de K-medias. Estas categorías se muestran y describen en el cuadro 15, mientras que la figura 32 muestra el mapa de distribución de los paisajes.

Los paisajes con Muy Alta Fragilidad abarcan aproximadamente 13400 km² (39%) y se distribuyen principalmente en la Mixteca Poblana en los límites con Oaxaca y Guerrero, como ejemplo se puede mencioar la unidad de paisaje CCXXVII caracterizada por geomorfología de lomeríos formados por rocas metamórficas correspondientes a Esquistos, en clima tipo semiárido cálido. En esta unidad de paisaje habita la especie de salamandra *Ambystoma velasci*, la cual es éndémica y se encuentra en la categoría de

protección especial por la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT 2010). Otras áreas con alta fragilidad se encuentran en las planicies del este en la zona de Libres-Oriental (figura 32). Sumando la superficie de paisajes con alta y muy alta fragilidad, se tiene que cerca de la mitad del Estado (49%) se incluye en estas categorías. En el otro sentido, los paisajes con muy baja fragilidad se localizan principalmente en el norte donde colinda Puebla con Veracruz y abarcan solo 680 km² (2%).

Cuadro 15. Superficie de las categorías de Fragilidad del paisaje y variables que las definen. Fuente: Elaboración propia.

Fragilidad	Singularidad del paisaje	Presencia de animales endémicos	Superficie		Número de unidades
			(km ²)	%	
Muy alta	Muy alta	Muy baja	13,386	39	249
Alta	Alta	Media	3,317	10	14
Media	Media	Baja	11,160	33	21
Baja	Baja	Alta	5,753	17	6
Muy baja	Baja	Muy baja	680	2	1

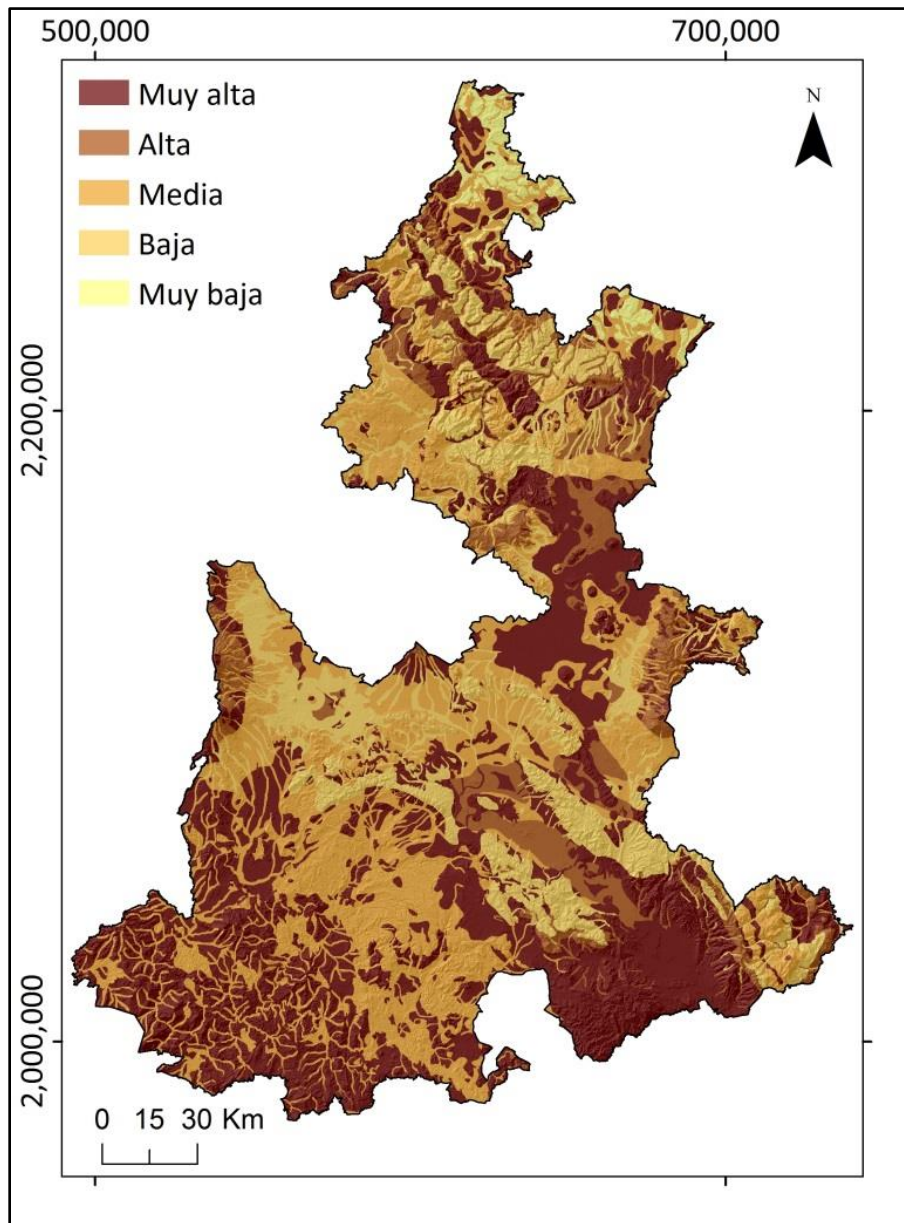


Figura 32. Mapa de distribución de la Fragilidad del paisaje. Fuente: Elaboración propia

Estabilidad Funcional del Paisaje

Con los atributos Biogeodiversidad y Fragilidad del paisaje se realizó la evaluación de Estabilidad Funcional del Paisaje, la cual consta de cinco categorías formadas por análisis de K-medias, en donde la máxima categoría de Estabilidad corresponde a paisajes con la mayor Biogeodiversidad y la menor Fragilidad.

Los resultados mostraron que 16400 km² (48%) poseen Estabilidad Funcional Muy Alta y 4500 km² (13%) tienen Estabilidad Alta; esto implica que la suma de ambas representa más de 60% del territorio estatal en donde las condiciones naturales son adecuadas para el buen funcionamiento del paisaje. Por el contrario, 5000 y 4200 km² (15 y 12% respectivamente) son paisajes con Baja y Muy Baja Estabilidad Funcional (cuadro 16). Respecto a la distribución de los paisajes funcionales, estos se localizan principalmente en el altiplano central, cerca de los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl y en sectores de la Sierra Norte; mientras que los de Baja y Muy Baja Estabilidad Funcional se encuentran en la Mixteca Poblana en la parte este y oeste (figura 33).

Cuadro 16. Categorías de Estabilidad Funcional y valores de los atributos que las definen. Fuente: Elaboración propia

Estabilidad Funcional	Fragilidad	Biogeodiversidad	Superficie (km ²)	%	Número de unidades
Muy alta	Muy baja, Baja y Media	Muy alta y Alta	16,383	48	23
Alta	Alta	Media	4,453	13	18
Media	Muy alta	Media	4,269	12	26
Baja	Muy alta	Baja	5,009	15	40
Muy baja	Muy alta	Baja	4,180	12	184

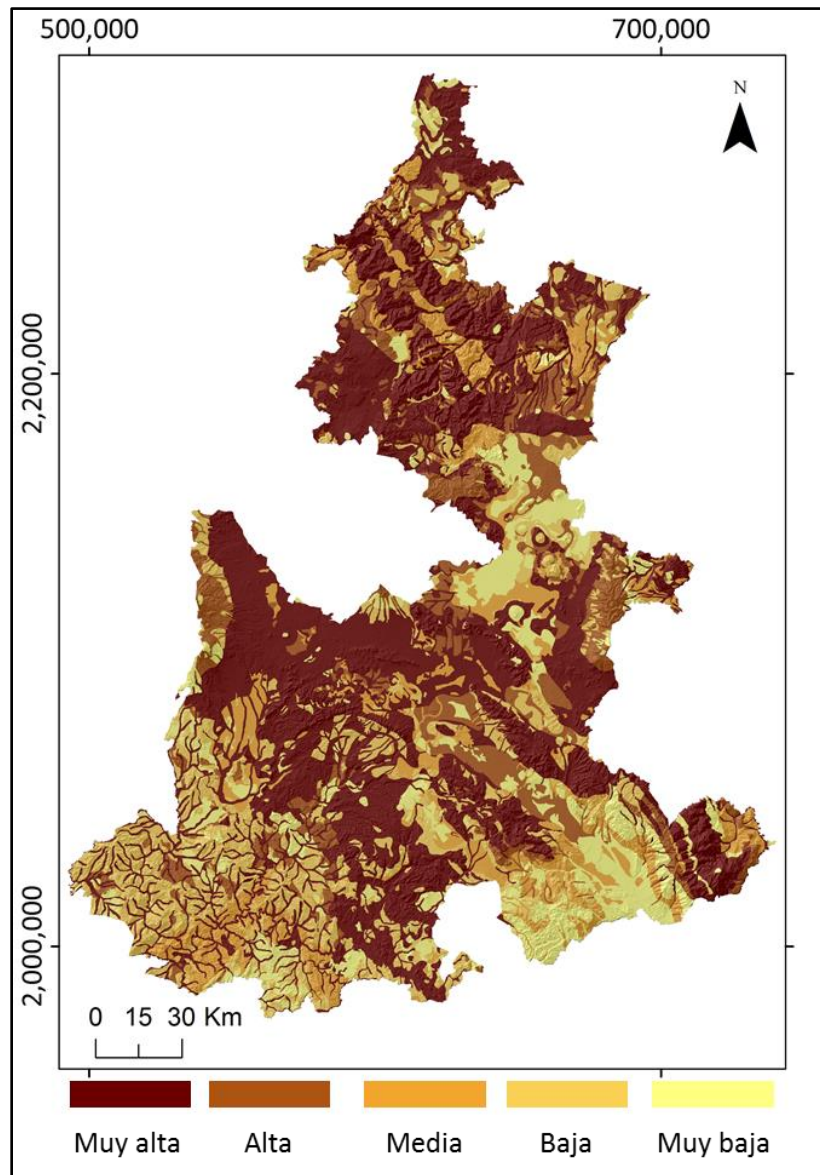


Figura 33. Mapa de distribución de la Estabilidad Funcional del Paisaje. Fuente: Elaboración propia

Finalmente la evaluación del Estado Ambiental del Paisaje se realizó integrando los atributos de Estabilidad Funcional con los atributos de problemas ambientales (Degradación del suelo y Antropización de la cobertura vegetal del suelo). De esta manera se generó un nuevo indicador de Estado Ambiental del Paisaje, formado por cinco categorías de acuerdo al método de K-medias. Las categorías de Estado Ambiental y su descripción se muestran en el cuadro 17. El mapa de distribución se muestra en la figura 34.

Cuadro 17. Categorías de Estado Ambiental y valores de los atributos que las definen. Fuente: Elaboración propia

Estado ambiental	Estabilidad funcional	Degradación del suelo	Antropización de la cobertura vegetal del suelo	Superficie		Número de unidades
				(km ²)	%	
Altamente Estable	Muy alta y Alta	Baja	Media	21,209	62	43
Medianamente Estable	Baja y Media	Muy bajo	Baja	5,227	15	70
Escasamente Estable	Muy baja	Media	Baja	4,221	12	96
Inestable	Muy baja	Baja	Media	1,206	4	34
Altamente Inestable	Muy baja	Muy alta, Alta y Media	Alta y Muy alta	2,432	7	48

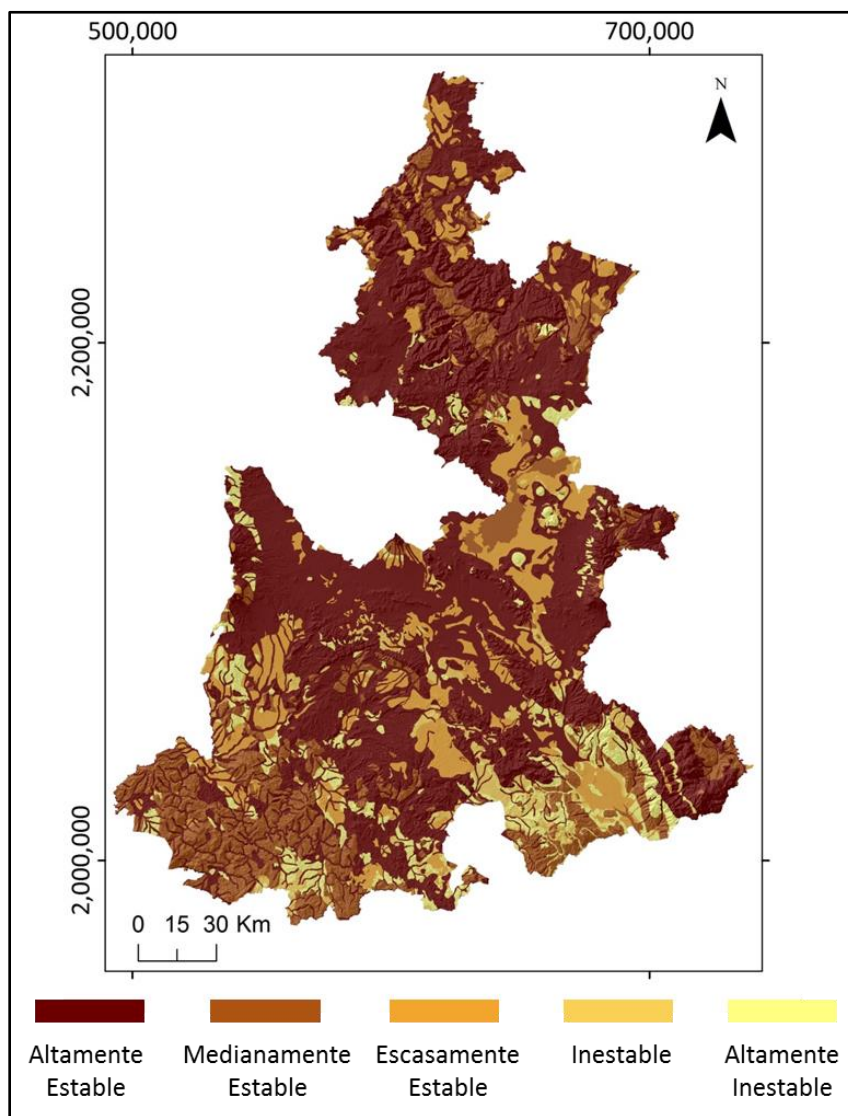


Figura 34. Mapa de distribución del Estado Ambiental del Paisaje. Fuente: Elaboración propia

4.5 SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL DE PAISAJES AGRÍCOLAS

Esta última evaluación se realizó integrando los atributos Estado Ambiental y Compatibilidad Agrícola en un valor de Sustentabilidad Ambiental. La Sustentabilidad Ambiental se representó mediante las categorías Altamente Sustentable, Sustentable, Medianamente Sustentable, Escasamente Sustentable y No sustentable, las cuales se describieron en el apartado 2.3 del marco teórico. La pertenencia de cada unidad de paisaje a una categoría se realizó mediante el método de K-medias previamente descrito y únicamente se consideraron para el análisis a las unidades de paisaje con uso principalmente grícola y medianamente agrícola.

Teóricamente, las unidades de paisaje Altamente Sustentables debe poseer Alta Compatibilidad Agrícola y Muy Alta Estabilidad Ambiental. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran que ninguna unidad posee ambos atributos simultáneamente y los conglomerados obtenidos por K-medias incluyeron valores de los atributos con la mayor similitud estadística posible.

De esta manera, las unidades Altamente Sustentables incluyen unidades Altamente Estables y Escasamente Estable, sin embargo presentan Alta Compatibilidad Agrícola. Las unidades Sustentables están representadas por unidades Altamente Estables principalmente y Medianamente Estables en menor superficie, aunque ambas poseen Compatibilidad Agrícola Mediana. La conformación de las categorías restantes de Sustentabilidad Ambiental y su superficie abarcada se muestra en el cuadro 18.

Cuadro 18. Superficie (km²) para cada categoría de sustentabilidad ambiental de los paisajes agrícolas y valores de los atributos que las definen. Fuente: Elaboración propia

Sustentabilidad ambiental	Estado Ambiental	Compatibilidad Agrícola			No agrícola
		Altamente compatible	Medianamente compatible	Incompatible	
		Superficie (km ²)			
Altamente sustentable	Altamente Estable	940	0	0	0
	Medianamente Estable	0	0	0	0
	Escasamente Estable	1,600	0	0	0
	Inestable	5	0	0	0
	Altamente Inestable	2	0	0	0
Sustentable	Altamente Estable	0	9,410	0	0
	Medianamente Estable	0	326	0	0
	Escasamente Estable	0	0	0	0
	Inestable	0	0	0	0
	Altamente Inestable	0	0	0	0
Medianamente sustentable	Altamente Estable	0	0	0	0
	Medianamente Estable	0	0	0	0
	Escasamente Estable	0	1,602	0	0
	Inestable	0	171	0	0
	Altamente Inestable	0	99	0	0
Escasamente sustentable	Altamente Estable	0	0	2,926	0
	Medianamente Estable	0	0	85	0
	Escasamente Estable	0	0	330	0
	Inestable	0	0	0	0
	Altamente Inestable	0	0	0	0
No sustentable	Altamente Estable	0	0	0	0
	Medianamente Estable	0	0	0	0
	Escasamente Estable	0	0	0	0
	Inestable	0	0	335	0
	Altamente Inestable	0	0	498	0
No agrícola	Altamente Estable	0	0	0	7,932
	Medianamente Estable	0	0	0	4,815
	Escasamente Estable	0	0	0	689
	Inestable	0	0	0	695
	Altamente Inestable	0	0	0	1,833

A continuación se presenta la interpretación de las características generales de cada categoría de Sustentabilidad, los atributos que la conforman, la superficie abarcada por las unidades de paisaje, su distribución estatal y algunas estrategias para su manejo. El mapa de distribución de todas las categorías de sustentabilidad ambiental de paisajes agrícolas se muestra en la figura 35.

Paisajes altamente sustentables. Son paisajes con potencial natural agrícola alto o muy alto y se usan principalmente para esa actividad. Sin embargo su Estado Ambiental presenta condiciones de inestabilidad, ya que su funcionalidad está limitada por la alta fragilidad de sus paisajes y la baja biogeodiversidad. La degradación del suelo por erosión es media, por lo que se requiere la implementación de obras de conservación de suelo como terrazas, zanjas, bordos de contención, barreras vivas, surcado del terreno a favor de la pendiente, técnicas de agricultura de conservación, entre otras. A pesar de que la mayor superficie de estos paisajes se destina a la agricultura, también hay presencia de tipos de vegetación con alto grado de naturalidad. Estos paisajes abarcan 2500 km² de la superficie estatal, que representa 14% de la superficie agrícola (cuadro 18). Se distribuyen principalmente hacia el sector este del altiplano central, en las planicies del este por la zona de los municipios de Libres-Oriental, así como al norte en la región abarcada por los municipios de Chignahuapan-Zacatlán (figura 35).

Paisajes sustentables. Incluye los paisajes con Compatibilidad Agrícola mediana ya sea porque su potencial agrícola es medio, pero se usan intensamente para la agricultura, o bien poseen alto potencial pero el uso agrícola es escaso. Sin embargo, para ambos casos, la mayoría de las unidades de paisaje tienen Estabilidad Ambiental Alta.

A partir de esta conformación de atributos, se puede deducir que en estos paisajes, la degradación del suelo no es un problema severo, además que la vegetación posee un alto nivel de naturalidad y moderado nivel de antropización. La Fragilidad del paisaje es baja por la escasa presencia de endemismos y no incluir unidades de paisaje con alta

singularidad. Además la Biogeodiversidad es alta por la abundancia de flora y fauna y la alta heterogeneidad del paisaje.

Estos paisajes abarcan en conjunto 9700 km², que representan 53% del área total de los paisajes agrícolas (cuadro 18). Se distribuyen principalmente en el altiplano central y la Sierra Norte (figura 35).

Paisajes medianamente sustentables. En el mismo caso que los paisajes sustentables, esta categoría integra paisajes con Compatibilidad Agrícola mediana, sin embargo su Estado Ambiental es Escasamente Estable. Esta conformación se debe a la elevada presencia de endemismos y de paisajes singulares que le confieren Fragilidad Alta, además la riqueza de flora y fauna silvestres es baja al igual que la heterogeneidad geoecológica.

En estos paisajes, la degradación del suelo por erosión es media y se requiere implementar prácticas de conservación de suelo en las zonas agrícolas. En estos paisajes es común la existencia de zonas con vegetación altamente conservada, dado que la antropización de la vegetación es baja. Al respecto, es necesario que en estas zonas de vegetación se utilicen de manera sustentable, para lo cual se puede aprovechar la provisión de diversos servicios ambientales que estas áreas poseen. De esta manera se puede proteger a las especies endémicas existentes y favorecer el aumento de la riqueza de flora y fauna silvestres.

Las unidades de paisaje en esta categoría, abarcan en conjunto 1900 km² que representan 10% del área de los paisajes agrícolas. Estos paisajes se distribuyen de manera dispersa en la Sierra Norte, en las planicies aluviales cercanas al municipio de Atlixco y a la región de Tepexi-Ixcaquixtla.

Paisajes escasamente sustentables. Son paisajes agrícolas incompatibles, ya que su potencial es bajo. Sin embargo su Estado Ambiental es altamente estable, al no tener problemas severos de degradación del suelo por erosión y por la existencia de áreas con vegetación con alto grado de naturalidad. La Fragilidad es baja por la escasa presencia de endemismos y de paisajes altamente singulares. La riqueza de flora y fauna es alta, así

como la heterogeneidad geoecológica. Debido a esta conformación y a que la agricultura en estos paisajes tiene potencial bajo o muy bajo, se recomienda explorar alternativas de uso que sean congruentes con su alta estabilidad ambiental, por ejemplo el aprovechamiento forestal sustentable, el ecoturismo y turismo de naturaleza. En el caso de ser imprescindible mantener un uso agrícola, este podría favorecer el establecimiento de cultivos que sean aptos a las condiciones geográficas del paisaje e implementar actividades para la protección del suelo ante la erosión. Los sistemas agroforestales son una opción productiva y que asegura el uso eficiente de los recursos y el espacio.

Las unidades de paisaje en esta categoría, abarcan en conjunto 3300 km² que representa 18% de la superficie de paisajes agrícolas de Puebla y se distribuyen principalmente en la Sierra Norte hacia la vertiente al Golfo de México; al este del Estado en áreas cercanas al cofre de Perote en los límites con Veracruz; en lomeríos y planicies cercanas al volcán Pico de Orizaba también al este; en lomeríos del sector sur y oeste del altiplano central cercanos a los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl; en paisajes montañosos de la Sierra Negra al sureste; así como en pequeñas zonas de montaña y lomeríos dispersos en la Mixteca Poblana.

Paisajes no sustentables. Son paisajes agrícolas incompatibles debido a que su potencial es bajo, además de poseer un Estado Ambiental Inestable o Altamente Inestable. Esta conformación, indica que hay problemas muy severos de degradación del suelo por procesos erosivos fuertes o extremos, de origen hídrico o antrópico. La vegetación natural ha sido altamente transformada en campos agrícolas, pastizales o zonas urbanas. Como consecuencia, la riqueza de flora y fauna es escasa así como la heterogeneidad geoecológica. El uso de estos paisajes debe corresponder con actividades que se puedan desempeñar con su potencial y es altamente prioritario que se establezcan programas de restauración ecológica, que incluyan la recuperación de suelos erosionados, el enriquecimiento de la vegetación natural y el mejoramiento de la biodiversidad del lugar.

Las unidades de paisaje que se encuentran en esta categoría, abarcan en conjunto 800 km² lo que representa 5% del área de paisajes agrícolas de Puebla. Se distribuyen

principalmente en lomeríos y planicies de la Sierra Norte que colindan con los Estados de Tlaxcala e Hidalgo; en planicies y piedemontes de la región Libres-Oriental al este; y en paisajes aislados en la Sierra Mixteca al sur.

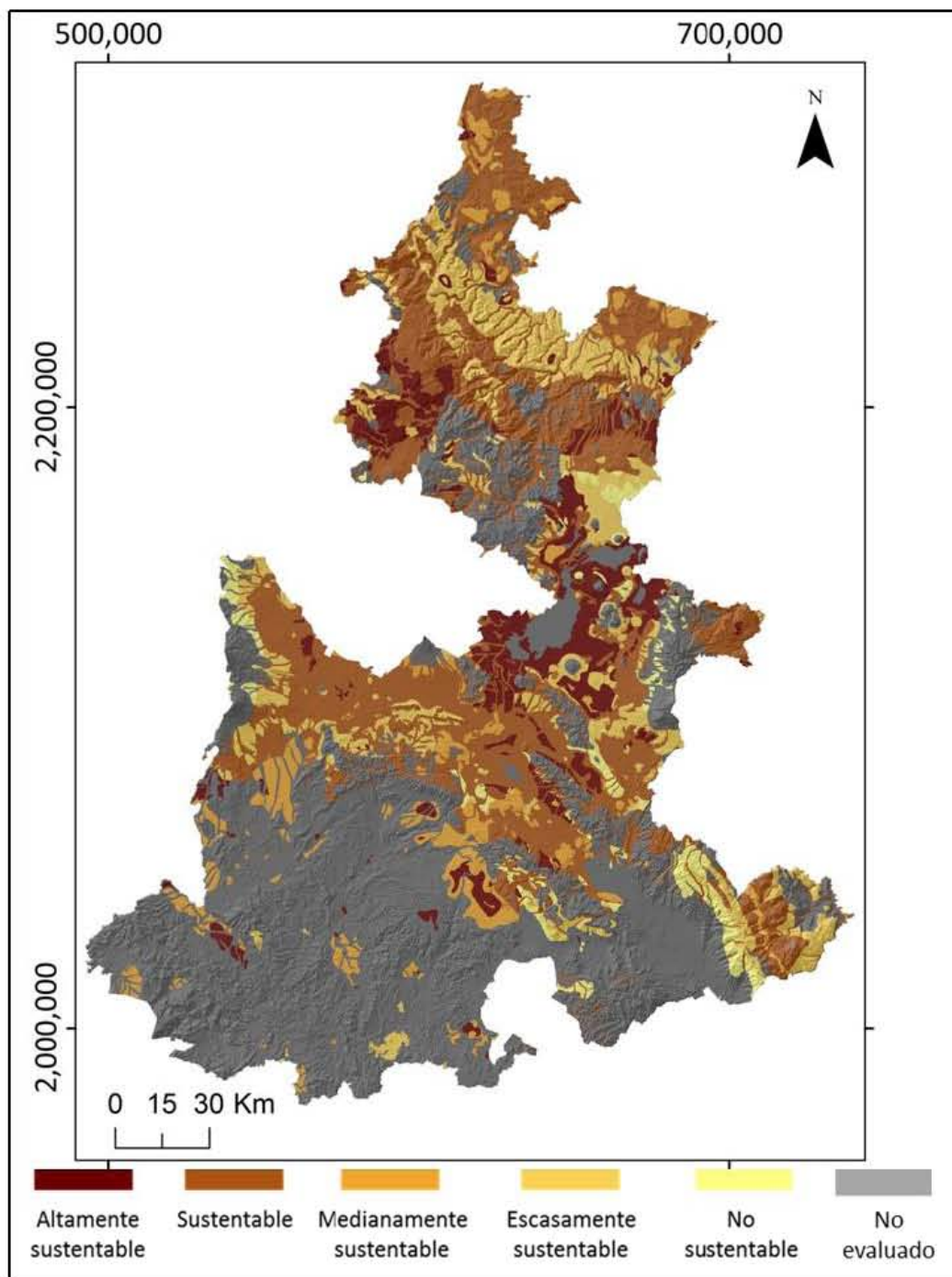


Figura 35. Mapa de distribución de la sustentabilidad ambiental de paisajes agrícolas en el Estado de Puebla.
Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta investigación se presentó una propuesta metodológica para evaluar la sustentabilidad ambiental de los paisajes agrícolas, la cual se desarrolló en el Estado de Puebla, México. El proceso metodológico incluyó 1) la caracterización y cartografía de unidades de paisaje, 2) la valoración del potencial natural para la agricultura de temporal en las unidades, 3) el análisis de Compatibilidad Agrícola, 4) la evaluación del Estado Ambiental del Paisaje y 5) la evaluación de la Sustentabilidad Ambiental de los paisajes agrícolas.

Los resultados evidenciaron la gran complejidad físico-geográfica del Estado de Puebla, ya que más de la mitad del territorio son montañas o lomeríos, la litología es diversa debido al tectonismo y vulcanismo ocurrido en diferentes momentos geológicos, sin embargo dominan los paisajes con depósitos aluviales. El clima también es variado ya que se tiene presencia de 16 tipos, abarcando desde los fríos de montaña, templados, semicálidos y cálidos, hasta los áridos, sin embargo domina el templado subhúmedo en un tercio del Estado. La cobertura vegetal del suelo incluye 17 tipos, encontrándose bosques, selvas, praderas de montaña, matorrales y pastizales, así como una gran proporción de tierras agrícolas principalmente de temporal y riego en menor cantidad. Respecto a la edafología, existen 16 grupos principales de suelos, con dominancia de Leptosoles. La integración de estos componentes físico-geográficos en unidades de paisaje, dio como resultado la delimitación de 291 unidades superiores y 717 inferiores.

Se encontró que 55% del Estado posee alto potencial para la agricultura de temporal, sin embargo solo 7% de se usa exhaustivamente para este tipo. En el otro sentido, se identificó que 12% de la superficie estatal se destina a la agricultura a pesar de su bajo potencial. Como resultado de esta investigación, se generaron diversos mapas de potencial agrícola, de biodiversidad, de geodiversidad, de degradación de suelos y de transformación de la cobertura vegetal. Estos mapas se pretende que ayuden a la planificación de actividades en el paisaje para hacer un mejor aprovechamiento de los

recursos naturales del Estado de Puebla, así como para planificar actividades que atiendan los problemas ambientales resultado del uso incompatible de los paisajes agrícolas.

Respecto al Estado Ambiental, su determinación integró valoraciones de la estructura físico-geográfica del paisaje, de atributos de biodiversidad, heterogeneidad geocológica, degradación del suelo y la antropización de la cobertura vegetal del suelo. Con base en los resultados obtenidos se encontró que más de 60% del Estado lo constituyen paisajes con gran estabilidad ambiental. Con base en esto, se requiere del diseño de estrategias de uso o aprovechamiento de estos paisajes que permitan el mantenimiento de su estabilidad, así como mejorar las condiciones ambientales de los paisajes inestables.

Finalmente, el análisis de sustentabilidad ambiental permitió identificar que cerca de 70% de los paisajes agrícolas se utilizan de manera sustentable. No obstante se debe asegurar que las funciones ambientales en este tipo de paisajes se mantengan junto a su uso agrícola. En primer lugar se debe asegurar que las funciones del suelo se mantengan, junto con la conservación y mejoramiento de la biodiversidad y el mantenimiento de áreas con vegetación natural cercanas a los sitios agrícolas. Como opción agroecológica, se puede establecer un sistema de barreras vivas con especies arbóreas que pueden ser frutales, los cuales además de su función productiva, actúan como refugio de especies silvestres y mejoran la conectividad ecológica dentro del paisaje agrícola, además de disminuir la intensidad de los vientos y el escurrimiento de agua que provocan la erosión del suelo.

En el otro extremo, 23% del área agrícola posee condiciones no sustentables o que tienden a ella, por lo que se deben implementar programas de restauración ambiental que incluyan la conservación y rehabilitación de los suelos, la recuperación de la cobertura vegetal y el enriquecimiento biológico. Además se debe valorar la posibilidad de implementar usos alternativos del paisaje que sean de bajo impacto al ambiente. Dentro de los usos alternativos, se puede incluir las plantaciones agroforestales o forestales, el aprovechamiento de estos paisajes para turismo de naturaleza o ecoturismo con bases sustentables, o bien el establecimiento de reservas ecológicas que permitan la recuperación

de las funciones ecosistémicas que se han perdido. Estos paisajes se localizan principalmente en fragmentos de la Sierra Norte y Sierra Mixteca.

Los resultados de la investigación, así como los productos cartográficos y bases de datos generados, constituyen un aporte importante para la planificación ambiental del uso del territorio en el Estado de Puebla y el enfoque metodológico tiene alto potencial para su replicación en otros casos de análisis territorial para unidades geográficas con límites político-administrativas o en regiones naturales como las cuencas hidrológicas.

La propuesta metodológica presentada en este trabajo, posee una estructura organizada y clara, de tal manera que su implementación se puede realizar por personal técnico con conocimientos básicos sobre sistemas de información geográficos y la aplicación de pruebas estadísticas simples. Así mismo, las categorías de análisis sugeridas son fácilmente interpretables por un público no especializado.

La escala cartográfica de esta investigación, corresponde al análisis geográfico de nivel regional. Esta escala es común que se emplee para la elaboración de estudios de ordenamiento y planificación territorial, dado que existe una gran disponibilidad de cartografía temática para todo el país.

Finalmente el método de evaluación puede hacerse más robusto con la inclusión de un enfoque dinámico a través de la incorporación de tasas de degradación de suelo y vegetación para analizar su dimensión temporal e identificar tendencias de cambio y proyecciones a futuro. Además se puede incluir atributos de la dimensión social y económica de la sustentabilidad y seleccionar variables indicadoras que sean adecuadas en términos de la escala de trabajo. De esta manera se tendrá una valoración más integral de la sustentabilidad agrícola del paisaje.

BIBLIOGRAFÍA.

- Acosta-Villegas, M.A. 2008. Evaluación del potencial ecoturístico de un sector de la región Sierra-Costa de Michoacán. Tesis de Maestría en Geografía. Posgrado en Geografía-CIGA, UNAM. 109 pp
- Acosta-Villegas, M.A. y A. Priego-Santander. 2010. Evaluación del potencial ecoturístico de un sector de la región Sierra-Costa de Michoacán, México. Memorias del II Congreso de Ciencia y Arte del Paisaje, Puerto Vallarta, Jalisco, México, 13 al 17 de Octubre de 2010. Academia Mexicana de Paisaje y Universidad de Guadalajara. CD. pp: 1-30
- Ainstein, L., M. Aslan, S. Fajre, D. Kullock y E. Rodríguez. 1993. Problemática Ambiental urbana. Documento MAB 11. Argentina
- Alvarado-Carmona, M., F. Lozano-Romen, M. Martínez-Ortega y A. Colmeneros-Robles. 2006. Usos y destinos de los suelos en la región de Cuetzalan, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas* 59: 43-58. doi: 10.14350/rig.30020
- Antrop, M. 2004. Landscape research in Europe. *Belgeo* 2-3: 199-207
- Arnalds, O. 2008. Andosols. En Chesworth, W. (editor). *Encyclopedia of Soil Science*. Springer Netherlands, pp: 39-46.
- Astier, M y C. González. 2008. Formulación de indicadores socioambientales para evaluaciones de sustentabilidad de sistemas de manejo complejos. En Astier, M., O. Masera y Y. Galván-Miyoshi (coordinadores). *Evaluación de sustentabilidad, un enfoque dinámico y multidimensional*. 200 pp
- Bailey, R.G. 2009. *Ecosystem Geography. From ecorregions to sites*. 2th Edition. Springer Ed. New York, USA. 251 pp
- Baležentienė, L. 2010. The impacts of farming systems management and habitat's anthropogenic level on phytodiversity. *Acta Biologica Universitatis Daugavpiliensis*, supplement 2: 9-16
- Banco Mundial. 2008. *Sustainable land management sourcebook*. The World Bank, Washington, DC. USA

- Bastian, O. 2000. Landscape classification in Saxony (Germany), a tool for holistic regional planning. *Landscape and urban planning* 50: 145-155
- Bastian, O. 2001. Landscape Ecology – towards a unified discipline? *Landscape Ecology* 16: 757–766
- Bastian, O. D. Haase y K, Grunewald. 2012. Ecosystem properties, potentials and services – The EPPS conceptual framework and an urban application example. *Ecological Indicators* 21:7-16. doi:10.1016/j.ecolind.2011.03.014
- Bastian, O., R. Krônert y Z. Lipský. 2006. Landscape diagnosis on different space and time scales, a challenge for landscape planning. *Landscape Ecology* 21:359-374. doi: 10.1007/s10980-005-5224-1
- Bautista, F., A.J. Zinck y S. Cram. 2009. Los suelos de Latinoamérica: retos y oportunidades para el desarrollo. *Boletín de los sistemas nacionales, estadístico y de información geográfica* 2(3): 93-142
- Bocco, G., M. Mendoza, A. Priego y A. Burgos. 2010a. La cartografía de los sistemas naturales como base geográfica para la planeación territorial. Una revisión bibliográfica. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental – Universidad Nacional Autónoma de México. 72 pp
- Bocco, G., M. Mendoza, A. Velázquez y A. Torres. 1999. La regionalización geomorfológica como una alternativa de regionalización ecológica en México. El caso de Michoacán de Ocampo. *Investigaciones Geográficas* 40: 7-22 pp
- Bocco, G., A. Priego y H. Cotler. 2010b. The contribution of physical geography to environmental public policy development in Mexico. *Singapore Journal of Tropical Geography* 31: 215-223
- Bocco, G., A. Velázquez y C. Siebe. 2005. Using geomorphological mapping to strengthen natural resource management in developing countries. *Catena* 60: 239-253
- Bollo-Manent, M., J.R. Hernández-Santana y A.P. Méndez-Linares. 2014. The state of the environment in Mexico. *Central European Journal of Geosciences* 6:219-228. doi: 10.2478/s13533-012-0172-1

- Borja, R. e I. Alcántara. 2004. Procesos de remoción en masa y riesgos asociados en Zacapoaxtla, Puebla. *Investigaciones Geográficas* 53: 7-26
- Campos-Hernández, M. 2010. Integrated approach for the analysis of land-use change in the Mexican Pacific coast. Insights for improving land-use planning processes. Tesis Doctoral, Instituto de Ciencia, Tecnología y Ambiente, Universidad de Barcelona, España. 128 pp.
- CNA. Comisión Nacional del Agua. 2011. Red de estaciones climatológicas. Registros climáticos consultados hasta diciembre de 2011
- CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2011. La Biodiversidad en Puebla: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Puebla, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. México
- CONEVAL. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. 2012. Informe de pobreza y evaluación en el Estado de Puebla 2012. México, D.F. CONEVAL
- Duran, D. 2012. Proyectos ambientales y sustentabilidad. 1ª Edición. Lugar Editorial. Buenos Aires, Argentina.
- de Groot, R. 2006. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes. *Landscape and Urban Planning* 75: 175-186. doi:10.1016/j.landurbplan.2005.02.016
- de La Fuente, E. y S. Suárez. 2008. Problemas ambientales asociados a la actividad humana: la agricultura. *Ecología Austral* 18: 239-252
- de La Rosa, D. y C.A. van Diepen. 2003. Qualitative and quantitative land evaluation. En: Verheye, W. (ed.). *Encyclopedia of life support system (Eolss-Unesco)*, section 1.5 Land use and land cover. Eolss Publisher, Oxford
- del Val, E., E. Arnés, J.A. Gaona y M. Astier. 2013. Incidencia de gallina ciega, sistemas de manejo y variabilidad climática en la comunidad de Napízaro, Michoacán, México. *Agroecología* 8: 53-62
- Drozdo, A.V. 2007. Three notions of landscape as used in Russian practices of territory planning. En Dyakonov, K. N. Kasimov, A. Khoroshev y V. Kushlin (eds), *Landscape*

- analysis for sustainable development: Theory and applications of landscape science in Russia. Facultad de Geografía, Universidad de Moscú Lomonósov. Rusia
- Espinoza, A. 2013. Paisajes antro-po-naturales en Tzintzuntzan y sus alrededores. Tesis de Maestría en Geografía. Posgrado en Geografía-CIGA, UNAM
- ESRI. 2013. ArcGIS Desktop v10.2. DR. ESRI Inc. CA, USA
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1976. A Framework for Land Evaluation, Boletín de suelos 32. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1983. Guidelines: land evaluation for rainfed agriculture. Boletín de suelos 52. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1985. Guidelines: land evaluation for irrigated agriculture. Boletín de suelos 55. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1997. Zonificación agroecológica. Guía general. Boletín de suelos 73. Roma, Italia. Versión digital disponible en: <http://www.FAO.org/docrep/W2962S/w2962s00.htm#Contents>
Consultado en marzo de 2011.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2000. Ecocrop. <http://ecocrop.FAO.org/ecocrop/srv/en/home>
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2007. Quantifying land resources in developing countries - FAO's agro-ecological zones studies. División de suelos y aguas, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia. <http://www.FAO.org/docrep/T8300E/t8300e00.HTM>
Consultado en noviembre de 2013.
- Ferreira, J., R. Pardini, J. Metzger, C. Fonseca, P. Pompeu, G. Sparovek y J. Louzada. 2012. Towards environmentally sustainable agricultura in Brazil: challenges and opportunities for applied ecological research. Journal of Applied Ecology 49: 535-541. doi: 10.1111/j.1365-2664.2012.02145.x

- Flores-Domínguez, A.D y A. Priego-Santander. 2011. Zonificación funcional ecoturística de la zona costera de Michoacán, México a escala 1: 250 000. Revista Geográfica de América Central número especial EGAL: 1-15
- Flores-Domínguez, A.D., A. Priego-Santander y J. A. Ruiz-Careaga. 2014a. Componentes del paisaje en Puebla. En Ruiz-Careaga J., R. Castelán-Vega, V. Tamariz-Flores y M.A. Hernández (Editores). Ciencias Ambientales. Temáticas para el Desarrollo. Volumen VII. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México
- Flores-Domínguez, A.D., A. Priego-Santander, J. A. Ruiz-Careaga y M. Astier. 2014b. Mapa de Paisajes físico-geográficos del Estado de Puebla, México a escala 1:250 000. Universidad Nacional Autónoma de México
- Fregoso, A., A. Velázquez, G. Bocco y G. Cortez. 2001. El enfoque de paisaje en el manejo forestal de la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. Investigaciones geográficas 46: 58-77
- Frolova, M. 2001. Los orígenes de la ciencia del paisaje en la geografía Rusa. Scripta Nova Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales 102, 1 de diciembre de 2001
- Frolova, M. 2006. Desde el concepto de paisaje a la teoría de geosistema en la geografía rusa: ¿hacia una aproximación geográfica global del medio ambiente? *Ería* 70: 225-235
- FUPPUE. Fundación Produce Puebla. 2011. Red de monitoreo de estaciones agroclimáticas del Estado de Puebla. Registros consultados hasta diciembre de 2011
- Gallegos, A. 1997. La aptitud agrícola de los suelos. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro-Trillas. México
- García, E. 1998. Carta de climas de la República Mexicana a escala 1:1 000 000. CONABIO, México
- García-Romero, A. 1998. Geoecología del paisaje vegetal en el occidente de la Ciudad de México. *Anales de Geografía de Universidad Complutense* 18: 115-137.
- García-Romero, A. 2002. El paisaje: una herramienta en el estudio detallado del territorio. *Kuxulkab* 7(14): 22-33

- Green, R.E., S. J. Cornell, J.P.W. Scharlemann y A. Balmford. 2005. Farming and the fate of wild nature. *Science*, 307: 550–555
- Gobierno de la República. 2005. Los objetivos de Desarrollo del Milenio en México: Informe de avances 2005. 164 pp
- González-Amaro, R.M., A. Martínez-Bernal, F. Basurto-Peña y H. Vibrans. 2009. Crop and non-crop productivity in a traditional maize agroecosystem of the Highland of Mexico. *Journal of ethnobiology and ethnomedicine* 5:38. doi:10.1186/1746-4269-5-38
- González-Navarro, M. 1987. El maderismo y la revolución agraria. *Historia Mexicana* 37: 5-28
- Gower, J.C. 1971. A general coefficient of similarity and some of its properties. *Biometrics* 27(4): 857-871
- Haase, G. 1989, Medium scale landscape classification in the German Democratic Republic. *Landscape Ecology*, 3:29-41
- Harvey, C., O. Komar, R. Chazdom, B. Ferguson, B. Finegan, D. Griffith, M. Martínez-Ramos, H. Morales, R. Nigh, L. Soto-Pinto, M. Van Breugel y M. Wishnie. 2008. Integrating agricultural landscapes with biodiversity conservation in the Mesoamerican hotspot. *Conservation Biology* 22: 8-15. doi: 10.1111/j.1523-1739.2007.00863.x
- Hernández-Santana, J.R., C. López-Miguel, A.P. Méndez-Linares, M. Bollo-Manent y M.M. Ricárdez-Cabrera. 2009. Geomorphic compatibility of agricultural land use in the upper basin of the Lerma River, Mexico. *Journal of Maps* 2009: 253-262. doi: 10.4113/jom.2009.1015
- Hernández-Trejo, H., A.G. Priego-Santander, J.A. López-Portillo y E. Isunza-Vera. 2006. Los paisajes físico-geográficos de los manglares de la laguna de La Mancha, Veracruz, México. *Interciencia* 31: 211-219
- Hofer, G., H.H. Wagner, F. Herzog y P.J. Edwards. 2008. Effects of topographic variability on the scaling of plant species richness in gradient dominated landscapes. *Ecography* 31: 131-139

- Huggett. R. J. 1995. *Geoecology: an evolutionary approach*. Routledge Ed. New York, USA. 320 pp.
- IG-INE. 2003. Mapa del sistema clasificatorio del relieve de México, escala 1:250,000. Instituto de Geografía - UNAM, Instituto Nacional de Ecología - SEMARNAT. México
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 1998. Conjunto de datos vectoriales de geología Serie I, 1:250 000
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2000. Síntesis geográfica del Estado de Puebla
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2004a. Guía para la interpretación de cartografía de edafología
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2004b. Conjunto de datos alfanuméricos edafológicos, escala 1:250 000, serie I
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2007. Conjunto de datos vectoriales de edafología Serie II, 1:250 000
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2010a. Principales resultados del Censo de Población y Vivienda 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 132 pp
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2010b. Conjunto de datos vectoriales de las cartas topográficas 1:50 000 de Puebla
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2013a. Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, escala 1: 250 000 serie V
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2013b. Conjunto de Datos de Erosión del Suelo, Escala 1: 250 000 Serie I
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2014a. Marco geoestadístico nacional versión 6.2
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2014b. Guía para la interpretación de cartografía de erosión del suelo
- INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 2011. Red nacional de clima. Registros consultados hasta diciembre de 2011

- Iuss Working Group WRB. 2007. World Reference Base for Soil Resources 2006, primera actualización 2007. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Roma
- Kairis, O., C. Kosmas, C. Karavitis, C. Ritsema, L. Salvati, S. Acikalin, *et al.* 2014. Evaluation and selection of indicators for land degradation and desertification monitoring: types of degradation, causes and implications for management. *Environmental Management* 54: 971-82. doi: 10.1007/s00267-013-0110-0
- Kato, T.A., C. Mapes, L.M. Merat, J.A. Serratos y R.A. Bye. 2009. Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F. 116 pp
- Klijn, F. y H.A. Udo de Haes. 1994. A hierarchical approach to ecosystems and its implications for ecological land classification. *Landscape Ecology*. 9: 89-104. doi: 10.1007/BF00124376
- Klingebiel, A. y P. Montgomery. 1961. Land capability classification. USDA agricultural handbook 210, US Government Printing Office. Washington, DC
- Kumar, S., T.J. Stohlgren y G.W. Chong. 2006. Effects of spatial heterogeneity on native and non-native plant species richness. *Ecology* 87: 3186-3199
- Lander, E. 2011. La economía verde: el lobo se viste con piel del cordero. Informe del Transnational Institute. Institute of Policy Studies de Washington D.C. 10 p.
- Luna, A. 1999. La geografía de los recursos naturales en Cuba: potencial natural y combinaciones territoriales. *Investigaciones geográficas* 40: 99-109
- Mateo-Rodríguez, J.M. 1984. Apuntes de geografía de los paisajes. Imprenta Andre Voisin. La Habana, Cuba
- Mateo-Rodríguez, J.M. 2008. Planificación ambiental. Editorial Felix Varela, La Habana, Cuba. 166 pp.
- Mateo-Rodríguez, J.M. 2012. La dimensión espacial del desarrollo sostenible; una visión desde América Latina. Editorial UH, La Habana, Cuba. 294 pp
- Mateo-Rodríguez, J.M. y E.V. Da Silva. 2007. La geoecología del paisaje, como fundamento para el análisis ambiental. *Revista Electrónica de Prodema* 1: 77-98

- Mathews-Fernández, J. 2008. Evaluación de la modificación edafo-biógena de los paisajes de la región Sierra-Costa de Michoacán, México. Tesis de Maestría en Geografía. Posgrado en Geografía-CIGA, UNAM. 75 pp
- McIntosh, R. P. 1967. An index of diversity and the relation of certain concepts of diversity. *Ecology* 48: 1115-1126
- Mendoza, M., H. Plascencia, P. Alcántara, F. Rosete y G. Bocco. 2010. Análisis de la aptitud territorial, una perspectiva biofísica. INE-SEMARNAT-Ciga. México
- METI-NASA. 2012. ASTER Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM) V 2.0. <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>
- Molano-Barrero, J. 2004. Villa de Leyva: Ensayo de interpretación social de una catástrofe ecológica. Biblioteca Virtual del Banco de la República. Información consultada en Junio de 2012.
<http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/geografia/vleiva/indice.htm>
- Mora-Murguía, M.L. 2005. Regionalización natural de la cuenca media del río Atoyac, basada en el concepto de paisaje. Tesis de maestría en ciencias ambientales. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
- Moreno-Calles, A.I., V.M. Toledo y A. Casas. 2013. Los sistemas agroforestales tradicionales de México: una aproximación biocultural. *Botanical Sciences* 91: 375-398. doi: <http://dx.doi.org/10.17129/botsci.v91i4.419>
- Nichols, W.G., K.T. Killingbeck y P.V. August. 1998. The influence of geomorphological heterogeneity on biodiversity. II. A landscape perspective. *Conservation Biology* 12: 371-379.
- Novúa, O. 2011. Programa computacional Similitud v2.0. Instituto de Geografía Tropical de La Habana, Cuba
- Ortoll, S. 2003. Orígenes de un proyecto agrícola: la Fundación Rockefeller y la revolución verde. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente* 4: 81-96
- Ostaszewska, K. 2004. Four fundamental methodological problems of landscape geography. *Miscellanea Geographica* 11: 13-17

- Otero, G. 2004. ¿Adiós al campesinado? Democracia y formación política de las clases en el México rural. Colección América Latina y el Nuevo Orden Mundial. México, Editorial Miguel Ángel Porrúa, UAZ, Simon Fraser University. http://estudiosdeldesarrollo.net/pagina_tipo_cuatro.php?libro=adios_al_campesinado
- Phalan, B., M. Onial, A. Balmford y R.E. Green. 2011. Reconciling food production and biodiversity conservation: land sharing and land sparing compared. *Science* 333: 1289–1291
- PLADEYRA. Planificación, Desarrollo y Recuperación Ambiental. 2000. Ordenamiento ecológico de la cuenca de los ríos Filobobos y Solteros, Veracruz a escala 1:100 000. Planificación, Desarrollo y Recuperación Ambiental-Gobierno del Estado de Veracruz, Xalapa, México
- Posner, J. y M. McPherson. 1982. Agriculture on the steep slopes of tropical America: current situation and prospects for the year 2000. *World Development* 10: 341-353
- Priego-Santander, A.G. y G. Bocco. 2015. Tres niveles de análisis en la Sierra-Costa Michoacan, insumos para el ordenamiento ecológico. UNAM - CIGA, Morelia, México. 223 pp
- Priego-Santander, AG., Bocco, G., Mendoza, M. y Garrido, A. 2010. Propuesta para la generación de unidades de paisajes de manera semi-automatizada. Fundamentos y método. *Serie Planeación Territorial*. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT-INE-CIGA. Edición digital, formato electrónico. Número ISBN 978-968-817-923-9, 104p. http://www2.ine.gob.mx/emapas/download/paisaje_unidades_paisaje.pdf
- Priego-Santander, A.G., M. Campos, G. Bocco y L.G. Ramírez-Sánchez. 2013. Relationship between landscape heterogeneity and plant species richness on the Mexican Pacific coast. *Applied Geography* 40: 171-178
- Priego-Santander, A. G., P. Moreno-Casasola, J.L. Palacio-Prieto, J. López-Portillo y D. Geissert-Kientz. 2003. Relación entre la heterogeneidad del paisaje y la riqueza de especies de flora en cuencas costeras del Estado de Veracruz, México. *Investigaciones Geográficas* 52: 31-52

- Priego-Santander, A. G., J.L. Palacio-Prieto, P. Moreno-Casasola, J. López-Portillo y D. Geissert-Kientz. 2004. Heterogeneidad del paisaje y riqueza de flora: Su relación en el archipiélago de Camagüey, Cuba. *Interciencia* 29: 138-144
- Priego-Santander, A. G., A. Velazquez y C.E. Guadarrama. 2005. El análisis de modificación geocológica como herramienta del ordenamiento territorial: caso de estudio de la cuenca Lerma-Chapala, México. Memorias del tercer congreso internacional de ordenación del territorio. Guadalajara, Jalisco, México. Ediciones CUCSH. Universidad de Guadalajara
- R Core Team. 2015. R: A Language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. Disponible en <https://www.R-project.org/>
- Ramírez-Juárez, J. 2003. Lógica socioeconómica regional y pobreza rural: la ruralidad en el Valle de Puebla y la Cordillera del Tentzo, México. En Luzón, J., C. Stadel y C. Borges (coordinadores). Transformaciones regionales y urbanas en Europa y América Latina, Universidad de Barcelona, España
- Rámirez-Sánchez, L.G. 2013. Evaluación de los paisajes físico-geográficos de Michoacán. Tesis de Doctorado en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán
- Ramón, A., L. Martínez, C. Suárez, O. López y E. Salinas. 2013. Determinación de los potenciales agropecuario y silvícola del municipio de Guisa, Cuba. *Proyección* 7: 196-211
- Ritter-Ortíz, W., Guzmán-Ruíz, S.A. y Estrada-Betancourt, A. 1999. Un método gráfico para la regionalización agroecológica de recursos naturales. *Investigaciones Geográficas* 38: 57-68
- Romme, W.H. 1982. Fire and landscape diversity in subalpine forest of Yellowstone National Park. *Ecological Monographs* 52: 119-121
- Rossiter, D. 2003. Biophysical models in land evaluation. En: Verheye, W. (ed.). *Encyclopedia of life support system (Eolss-Unesco)*, section 1.5 Land use and land cover. Eolss Publisher, Oxford

- Rowe, J. S. 1995. Eco-diversity, the key to biodiversity. En: A protected areas gap analysis methodology (pp. 2-9). WWF Canada. Discussion Paper. 68 pp
- Ruíz-Careaga, J., M. Riverol-Rosquet, R. Castelán-Vega, E. Torres-Trejo y F. Martínez. 2004. Manejo y conservación de suelos en minifundios de la Sierra Norte de Puebla. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla-Fundación Produce Puebla A.C.- Instituto de Suelos de Cuba
- Ruíz-Careaga, J., M. Riverol-Rosquet, V. Tamariz-Flores y R. Castelán-Vega. 2005. Zonificación agroecológica de la Sierra Norte de Puebla. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla-Instituto de Suelos de Cuba-Secretaría de Desarrollo Social del Estado de Puebla
- SAGARPA. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2014. Servicio de información agroalimentaria y pesquera. Consultado en 2014
- Salinas, E., J. Quintela, L. Parga, J. Domínguez, F. Chávez, L. Serrano y A. Conde. 1999. Mapa de Paisaje, escala 1: 100 000. Ordenamiento ecológico territorial de Huasca de Ocampo, Hidalgo, Gobierno del Estado de Hidalgo, Litográfica Turmex. México
- Sánchez-Noriega, D. 2011. Potencial de los paisajes naturales para actividades de turismo de naturaleza en el sector de la costa michoacana Río Coalcomán- el Farito. Tesis de Maestría en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Morelia, Michoacán
- Santacruz, L. 2014. Zonificación agroecológica del sur del Estado de Puebla. Tesis de doctorado en ciencias ambientales. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Diario Oficial de la Federación (DOF), jueves 30 de diciembre de 2010
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2013. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2012. México
- Shishenko, P. G. 1988. Estabilidad de los paisajes a las cargas económicas. Geografía física aplicada. Editorial de la Escuela Superior de Kiev, Ucrania. 195p

- Símová, P. y K. Gdulová. 2012. Landscape indices behavior: a review of scale effect. *Applied Geography* 34: 385-394
- SMRN. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Puebla. 2005. Programa Institucional 2005-2011. Gobierno del Estado de Puebla
- Snacken, F. and M. Antrop. 1983. Structure and dynamics of landscape system in Landscape Synthesis, *Geoecological Foundations of Complex Landscape Management*. Veda Publ., Bratislava, Eslovenia, pp 10-30
- Spiridonov, A. I. 1975. Some theoretical problems in geomorphology. *Soviet Geography* 16: 395-402
- Tonial, T.M., E. Missio, J.E. Dos Santos, C. Henke-Oliveira, M.L. Holzschuch y N. Zang. 2005. Diagnóstico ambiental de unidades da paisagem da regio Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul no periodo de 1984 a 1999. *Revista brasileira de cartografia*, 57:213 - 225
- Travieso-Bello, A.C., A. Priego-Santander y P. Moreno-Casasola. 2013. Potencial natural del territorio: base para el ordenamiento de la ganadería bovina. En Sánchez-Salazar, M.T., G. Bocco-Verdinelli y J.M. Casado-Izquierdo (coordinadores). *La política de ordenamiento territorial en México; de la teoría a la práctica*. UNAM-IG-CIGA-SEMARNAT-INECC. México
- Turner, M.G. 1989. Landscape Ecology: The effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 20: 171-197
- Urquijo, P y G. Bocco. 2010. Los estudios de paisaje y su importancia en México 1970-2010. *Journal of Latin American Geography* 10: 37-63. doi: 10.1353/lag.2011.0025
- Valdés, J. 2004. ¿Es posible la sostenibilidad ambiental con la economía de mercado? *Rebelión* 5-10-2004. <http://www.rebellion.org/noticias/2004/10/6111.pdf>
- Vega. C. 27 de noviembre de 2014. Produce para autoconsumo 80% de agricultores poblanos. *El Sol de Puebla*. Recuperado de: <http://www.oem.com.mx/elsoldepuebla/notas/n3621197.htm>

- Velazco, W.E. 2014. Evaluación del estado ambiental de Michoacán a partir de la tipología físico-geográfica regional. Tesis de Maestría en Geografía. Posgrado en Geografía-CIGA, UNAM. 193 pp.
- Verheye, W. 2003. Land Evaluation. En: Verheye, W. (ed.). Encyclopedia of life support system (Eolss-Unesco), section 1.5 Land use and land cover. Eolss Publisher, Oxford
- WCDE. 1987. Our common future. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Disponible en: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm> Consultado en marzo de 2011.