

Resiliencia del suelo en los sistemas agrícolas del municipio de Calimaya

Soil resilience in agricultural systems in the Calimaya municipality

Belina García-Fajardo² , Gabino Nava-Bernal^{1*} , Gustavo Álvarez-Arteaga² , Sergio Franco-Maass¹ 

¹Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales. Dirección oficial: El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca México. CP. 50295. Toluca Estado de México, México.

²Facultad de Planeación Urbana y Regional. Universidad Autónoma del Estado de México. Paseo Tollocan esquina Mariano Matamoros S/N, Colonia Universidad, CP. 50130. Toluca, Estado de México. México

*Autor de correspondencia: gnavab@uaemex.mx

Nota científica

Recibida: 31 de agosto de 2022

Aceptada: 7 de junio de 2024

RESUMEN. La agricultura de temporal del Estado de México presenta procesos de degradación física y química que inciden en la calidad del suelo. El objetivo fue analizar la resiliencia de suelos agrícolas ante la presencia de estos procesos en la producción de maíz y papa, en el municipio de Calimaya, Estado de México. La metodología integra la evaluación de la calidad del suelo por indicadores físicos y químicos. Se identificaron tres patrones, dos de sistemas de maíz de temporal y uno de papa. Los procesos degradativos derivados del manejo agrícola disminuyen la calidad de los suelos, traducida en la pérdida de estructura, porosidad y disponibilidad de nutrientes. La baja calificación de los indicadores del suelo incide en su resiliencia a corto plazo, la cual es soportada con la inclusión de insumos externos y prácticas empíricas incipientes que mantienen una rentabilidad de la producción agrícola.

Palabras clave: Calidad de suelo, indicadores, agricultura de temporal, análisis de correspondencia, prácticas de manejo.

ABSTRACT. The rainfed agriculture of the State of Mexico presents physical and chemical degradation processes that affect soil's quality. The objective was to analyze the resilience of agricultural soils in the presence of these processes in the production of maize and potato, in the municipality of Calimaya, State of Mexico. The methodology integrates the evaluation of soil quality through physical and chemical indicators. Three patterns were identified: two of rainfed maize systems and one of potato. The degradative processes derived from agricultural management decrease the quality of the soils in the area, translated into the loss of structure and porosity and the availability of nutrients. It was identified that the low rating of soil indicators affects its short-term resilience, which is supported by the inclusion of external inputs and incipient empirical practices that maintain agricultural production profitability.

Keywords: Soil quality, indicators, rain-fed agriculture, multiple correspondence analysis, management practices.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas agrícolas han sufrido procesos de transformación con la finalidad de incrementar la productividad agrícola y seguridad alimentaria ante una mayor demanda de alimento asociado al crecimiento poblacional (Dardonville *et al.* 2022). Los sistemas agrícolas deberán evitar impactos negativos de la agricultura convencional y adaptarse a las limitantes vinculadas al cambio global y detrimento de los recursos naturales (Fanchone *et al.* 2020). Los procesos de intensificación en la agricultura desde la revolución verde han provocado la degradación de los recursos naturales disponibles que ha permeado la producción agrícola (Paas *et al.* 2021).

En México, la agricultura enfrenta escenarios y desafíos de degradación de suelos en sus procesos de producción y cuya vulnerabilidad va en aumento. A nivel nacional, coexiste una diversidad de sistemas de producción agrícola que van desde los sistemas de autoconsumo hasta agronegocios industriales, lo cual implica una heterogeneidad de características socioculturales, tecnológicas y económicas (Ibarrola-Rivas *et al.* 2020). Al respecto, Buitenhuis *et al.* (2020) señalan que los sistemas agrícolas están vinculados a procesos económicos y de redes sociales en las cuales operan y están siendo presionados bajo contextos socioeconómico, político, de crecimiento urbano y a los retos climáticos que confrontan sus habilidades para mantener sus diversas funciones productivas, sociales y ambientales, mientras que Mathijs y Wauters (2020) y Meuwissen *et al.* (2021) argumentan que la resiliencia de los sistemas agrícolas no solo abarca la capacidad para anticipar, enfrentar y responder a disturbios y amenazas o enfrentar la crisis, sino también de construir la capacidad de adaptarse o transformarse para hacer frente a una complejidad y acumulación económica, social, ambiental, estrés y choques institucionales.

Se pretende reconocer la resiliencia de los sistemas agrícolas, tomando en cuenta las características intrínsecas del suelo bajo las cuales se basa su función productiva y ambiental y que permiten el desarrollo de los modos de vida agrícolas. Los indicadores de la calidad del suelo contribuirán a comprender su resiliencia para afrontar los eventos inesperados o tendencias a largo plazo como los procesos de degradación (Castillo-Valdez *et al.* 2021). La resiliencia en suelo puede definirse como la capacidad de éste, con o sin la intervención del hombre, para mantener o recuperar la integridad estructural y funcional ante disturbios o eventos repentinos o a largo plazo, y que contribuya a hacer frente a los escenarios de incertidumbre. La resiliencia de suelos agrícolas es también el resultado de las prácticas de manejo adoptadas en el pasado y en el presente, que inciden en sus características actuales y que al mismo tiempo determinarán su capacidad de respuestas a las amenazas potenciales en el corto o largo plazo (Min-Suk *et al.* 2020).

El concepto de resiliencia se utiliza con la finalidad de integrar dimensiones naturales y sociales, sin embargo, son pocos los indicadores que se han incorporado para entender la resiliencia del suelo dentro de un marco de análisis (Assarkhaniki *et al.* 2020). La comprensión de la resiliencia del suelo se da entonces a partir de la explicación dentro del contexto de indicadores sociales locales, en particular, de los pequeños agricultores que dependen de la producción de cultivos de temporal; y son quienes padecen de los impactos de la degradación de suelo como la erosión, y de la eficiencia y limitaciones de acceso al agua asociados con la variabilidad climática (Chatterjee *et al.* 2021).

El municipio de Calimaya tiene sistemas de producción agrícola, que, si bien se han consolidado con el tiempo, hoy en día enfrentan problemas de degradación de suelo como resultado de actividades antrópicas que se han desarrollado en la zona (Abreu *et al.* 2022). Por ello, el objetivo fue proponer un acercamiento metodológico para identificar la resiliencia de suelos agrícolas ante la presencia de procesos de degradación ocasionados por las prácticas de manejo de maíz (*Zea mays* L.) y papa (*Solanum tuberosum*), en el municipio de Calimaya del Estado de México.

MATERIALES Y MÉTODOS.

Se empleó el método de caso de estudio en la localidad de Zaragoza de Guadalupe, municipio de Calimaya, Estado de México ($19^{\circ} 08' 46''$ LN y $99^{\circ} 38' 43''$ LO), situada a 17 km al sur de la ciudad de Toluca, capital del estado (Figura 1). El área de estudio registra una altitud promedio de 2 858 msnm, y cuenta con una extensión territorial de 101.19 km². El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano (Cw), temperatura media anual entre los 12 y 18 °C, con temperaturas máximas y mínimas medias de 26 °C y –4 °C, respectivamente; y precipitación que oscila entre 800 y 900 mm anuales. El material geológico está compuesto por rocas vulcanó-clásicas, andesíticas, brechas sedimentarias y materiales aluviales en su porción más baja. En la región es relevante la extracción de materiales piroclásticos subyacente a la superficie del suelo y que llegan a alcanzar profundidades entre 40 y 100 cm. Los suelos dominantes en la localidad corresponden a Feozems, Andosoles, Regosoles y Cambisoles con fertilidad media a alta, en los que predominan pH de ligeros a moderadamente ácidos (Ayuntamiento de Calimaya 2022).

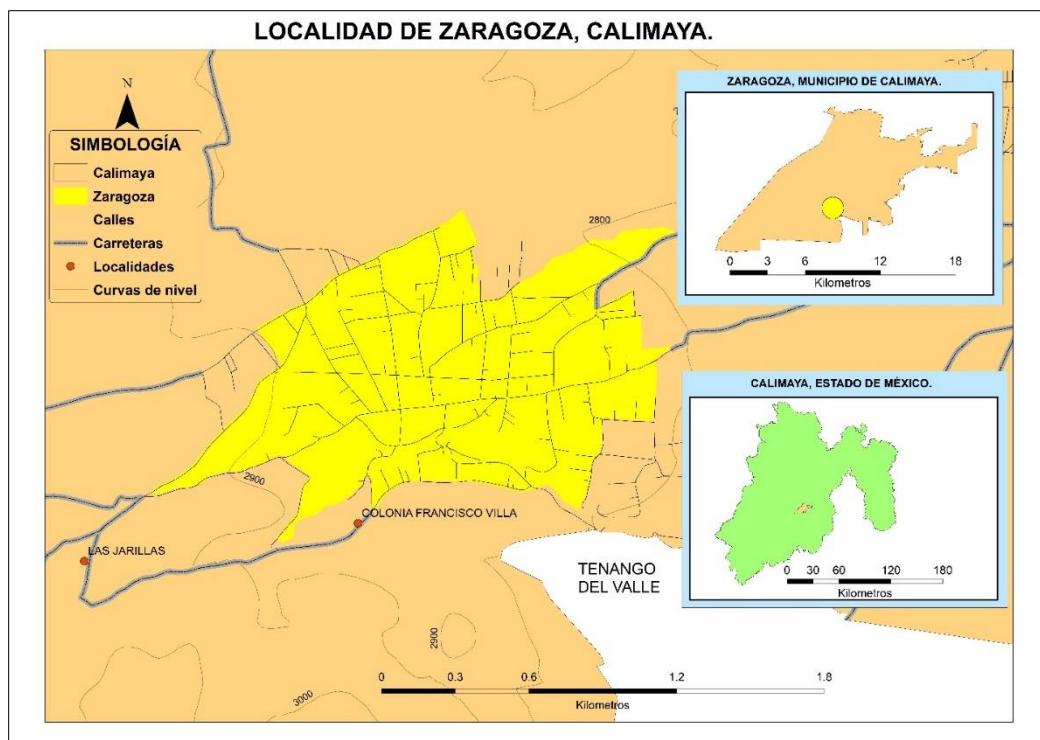


Figura 1. Localización del municipio de Calimaya

Estudio exploratorio.

Se realizó un estudio exploratorio de campo para identificar los procesos que determinan la degradación del suelo y sus implicaciones sobre la resiliencia. Se aplicaron entrevistas a miembros de 34 Unidades Familiares Campesinas (UFC), abordando cuatro temáticas relacionadas con la resiliencia. El instrumento se estructuró y adaptó a partir de la propuesta de la Organización Humanitaria Internacional (GOAL), como herramienta para medir resiliencia comunitaria ante desastres (Tabla 1).

Tabla 1. Estructura de variables para identificar la resiliencia de suelo.

Área temática: Estructura social		
Componente de la resiliencia	Pregunta clave	Descripción
Actividad	¿Cuál es su actividad principal al interior de la unidad Familiar?	Tres actividades se identificaron: 1) Agricultura como actividad principal; 2) Otras actividades en la comunidad y 3) Actividades fuera de la comunidad (Estudiante, policía, empleada doméstica o servidor público)
Número de actividades	¿Cuántas actividades realiza?	A partir de la pregunta anterior, consideraron el número de actividades, por ejemplo, agricultura y pastores igual a dos actividades.
Área temática: Sistema agrícola		
Calidad	¿Como percibe la calidad de su cultivo?	La calidad se mantiene en términos de producción; la calidad no se mantiene y la calidad varía dependiendo de la disponibilidad de recursos.
Diversidad de cultivos	¿Cuáles son los cultivos importantes?	Número de cultivos presentes en la unidad familiar.
Manejo	¿Qué manejo le da al cultivo?	
Área temática: Amenazas		
Degradación	¿Ha notado presencia de desgaste de suelo?	Si percibe una degradación y no hay percepción del suelo.
Presencia de degradación	¿Cómo nota la presencia de desgaste del suelo?	Erosión de suelo causado por exceso de lluvias; Formación de cárcavas; No percibe degradación y No se registró el dato
Amenaza	¿Qué amenaza se presenta en su cultivo?	Eventos debidos al clima; Eventos debidos a plagas y enfermedades; y ambos.
Número de amenazas	¿Cuántas amenazas se presentan durante el cultivo?	Con base a la pregunta anterior se contabilizaron el número de amenazas.
Área temática: Estrategias de conservación		
Estrategias	¿Realiza alguna estrategia para detener el desgaste de la tierra?	No se realizan estrategias de conservación debido a la topografía del terreno; Rellenar barrancas con materiales disponibles en la comunidad como son llantas, costales, hierba o ramas, botones (Práctica local), o zanjas de desagüe;
Número de estrategia	¿Cuántas actividades realiza para detener el desgaste de la tierra?	Labranza mínima e incorporación de MO; Botones y llenar zanjas; Botones más zanjas; Manejo y zanjas; Botones y manejo zanjas más lleno, plantación de árboles.

A partir del estudio exploratorio, se definieron 10 sitios representativos para la evaluación de la calidad del suelo que consideraron las siguientes modalidades de sistemas de producción: 1) Maíz

de temporal en ladera (MTL), 2) Maíz de temporal (MT), 3) Maíz en temporal con actividades extractivas (MT-E), y 4) Cultivo de papa menor a 5 años (CP) (Bobadilla *et al.* 2019).

Evaluación de la calidad del suelo.

En general, los enfoques actuales sobre resiliencia proponen la inclusión de parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo, que pueden ser herramientas complementarias al entendimiento complejo de los sistemas agrícola y resultan ser relevantes (Ludwing *et al.* 2018). A partir del análisis de la información proveniente del estudio exploratorio y de observaciones directas en campo, el estudio edafológico se realizó en 10 sitios representativos de los principales sistemas productivos de la localidad. Para determinar la calidad o salud de suelo, se parte del método desarrollado por Soares *et al.* (2018), el cual consiste en la toma de muestras de suelo a 30 cm de profundidad y la evaluación visual de cinco indicadores físicos relacionados con su calidad. La evaluación fue complementada con tres indicadores químicos mediante análisis de laboratorio, siguiendo los métodos establecidos por el reporte sobre la información mundial. La relación completa de indicadores y criterios de evaluación de las muestras colectadas se muestran en la Tabla 2.

Evaluación de la calidad del suelo.

En general, los enfoques actuales sobre resiliencia proponen la inclusión de parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo, que pueden ser herramientas complementarias al entendimiento complejo de los sistemas agrícola y resultan ser relevantes (Ludwing *et al.* 2018). A partir del análisis de la información proveniente del estudio exploratorio y de observaciones directas en campo, el estudio edafológico se realizó en 10 sitios representativos de los principales sistemas productivos de la localidad. Para determinar la calidad o salud de suelo, se parte del método desarrollado por Soares *et al.* (2018), el cual consiste en la toma de muestras de suelo a 30 cm de profundidad y la evaluación visual de cinco indicadores físicos relacionados con su calidad. La evaluación fue complementada con tres indicadores químicos mediante análisis de laboratorio, siguiendo los métodos establecidos por el reporte sobre la información mundial. La relación completa de indicadores y criterios de evaluación de las muestras colectadas se muestran en la Tabla 2.

Análisis Estadístico.

Para comprender el comportamiento de las variables edáficas consideradas para el estudio, se efectuó una prueba de correlación lineal simple, identificándose las interacciones significativas ($p < 0.5$). Posteriormente y con objeto de identificar aquellos indicadores que evidencian las principales causas de degradación en los sistemas productivos se realizó la prueba de Análisis de Correspondencia Múltiple mediante el software PASW Statistics 18.0 (López *et al.* 2022).

Tabla 2. Indicadores físicos y químicos de la calidad del suelo (FAO 2008).

Indicador	Condición / evaluación del indicador			
	0 Bajo	1 moderado	2 bueno	3 muy bueno
Indicadores físicos				
Textura	Gran cantidad de fragmentos gruesos y/o arenas, poca retención de agua y nutrientes, fuertes limitantes para el desarrollo radicular	Texturas franco arenosas con retención moderada de agua y nutrientes, sin limitación física para desarrollo radicular	Texturas franco arenosas o franco arcillo arenosas. Suelos moderadamente plásticos, buena retención de agua y nutrientes, propensión a compactación superficial	Textura franco limosa o franco arcillo limosa. Muy buena retención de agua y nutrientes, sin limitaciones para el desarrollo radicular.
Estructura y porosidad	Sin estructura, bloques grandes, densos, angulares, con pocos poros visibles se requiere mucha fuerza para fraccionarlos. Baja regulación del intercambio de gases y agua. Alta dificultad para el desarrollo radicular	Estructura de bloques medianos y grandes angulares y subangulares con evidencia de poros gruesos y algunos medios y finos. Se observan algunas raíces medias. Moderada regulación de agua y aire	Estructura de bloques subangulares medios, poros medios abundantes pero escasos poros finos. Buena condición para el intercambio de agua y aire	Estructura de bloques subangulares medios y finos alta presencia de poros y raíces finas, condiciones adecuadas para el intercambio de agua y aire
Densidad Aparente	Entre 1.4 y 1.6 g cm ³ . Suelos muy pesados, arcillosos, con dificultades para el intercambio de agua y aire, fuertes limitantes para el desarrollo radicular	Entre 1.2 y 1.4 g cm ³ . Suelos densos, con limitantes para el desarrollo radicular y deficiencias moderadas para el intercambio de agua y aire	Entre 1.0 y 1.2 g cm ³ . Suelos medianamente ligeros, buenas condiciones para el desarrollo radicular y pocas limitantes para el intercambio de agua y aire	Menor a 1 g cm ³ . Sin limitantes para el desarrollo radicular, muy buena capacidad para el intercambio de agua y aire
Nivel de erosión	Erosión hídrica en cárcavas profundas en más del 50%	Erosión hídrica laminar y en surcos en menos del 50% de la superficie	Evidencias escasas de erosión laminar moderada en menos del 10% de la superficie	Sin evidencias de erosión de algún tipo
Profundidad efectiva	Suelos con profundidad efectiva menor a 25 cm, baja disponibilidad para el desarrollo radicular y toma de nutrientes en la mayoría de los cultivos	suelos con profundidad efectiva menor a 50 cm, moderada limitación en algunos cultivos para el desarrollo radicular y toma de nutrientes	Suelos con al menos 100 cm de profundidad y condiciones adecuadas para el desarrollo de la mayoría de los cultivos, retención de humedad y nutrientes	Suelos con más de 100 cm de profundidad, amplia disponibilidad para el desarrollo radicular y toma de nutrientes.
Indicadores químicos				
pH	pH entre 4 y 5. Suelos fuertemente ácidos, se presentan problemas de disponibilidad para algunos nutrientes, toxicidad ligera por aluminio activo	pH entre 5 y 6 algunos problemas para la disponibilidad de nutrientes en especies poco tolerantes	Suelos ligeramente ácidos 6 y 6.5 o ligeramente alcalinos 7.5 a 8 buenas condiciones para la disponibilidad y absorción de nutrientes	pH entre 6.5 y 7.5 Condiciones óptimas para la disponibilidad y absorción de nutrientes
Capacidad de Intercambio Catiónico	menor de 15 Cmol kg ⁻¹ muy baja CIC escasa disponibilidad de nutrientes	entre 15 y 25 Cmol kg ⁻¹ Disponibilidad media de intercambio de cationes	Entre 25 y 40 Cmol kg ⁻¹ Disponibilidad alta de cationes intercambiables	Más de 40 Cmol kg ⁻¹ Muy alta disponibilidad de cationes intercambiables
Nitrógeno total	Muy bajo. Los cultivos presentan fuertes deficiencias en su	Medio Los cultivos presentan deficiencias en su	Alto. Buen desarrollo de los cultivos, en ocasiones se requiere	Muy alta disponibilidad para el desarrollo

	desarrollo, Se requiere suplementación	el desarrollo , se requiere suplementación	suplementación en el caso de cultivos altamente demandantes	vegetal, no se requiere suplementación.
Fósforo asimilable	Baja menos de 15 mg kg ⁻¹ . Muy limitada disponibilidad de P. Se requiere la suplementación para el desarrollo eficiente de los cultivos	Medio entre 15 y 25 kg kg ⁻¹ Disponibilidad media de P en el suelo, se requiere suplementación para cultivos	Bueno entre 25 y 30 mg kg ⁻¹ Buena disponibilidad para los cultivos	Alto, más de 30 mg kg ⁻¹ no se requiere suplementación para los cultivos
Materia orgánica	Suelos con menos de 1% de materia orgánica	Contenido de MO entre 1 y 2%	Contenido de MO entre 2 y 4%	Contenido de MO superior al 4%

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del estudio exploratorio aplicado a las UFC sobre temáticas asociadas a la resiliencia describen los siguientes aspectos: caracterización de la UFC y los tipos de sistemas agrícolas del municipio, y procesos de transformación del territorio, uno por la agricultura y el segundo a partir de la venta de materiales pétreos para la construcción y por último, la percepción de amenazas y adopción de estrategias como se explica a continuación:

UFC y los sistemas agrícolas del caso de estudio

La UFC se enfoca a la producción de maíz y papa de temporal con una edad promedio del jefe de la UFC de 52 años. El cultivo de papa es de reciente introducción en el área de estudio (en la última una década) y adoptado por jefe de las UFC más jóvenes. El promedio de integrantes en las UFC para los sistemas es de cuatro integrantes, por lo requieren contratar mano de obra dentro o fuera de la comunidad para su producción de cultivos.

En los sistemas de producción agrícola en Calimaya predomina los cultivos de maíz y papa. El maíz está enfocado en la producción de la variedad conocida como *cacahuacintle* la cual tiene valor de autoconsumo y principalmente comercial por sus diversos usos culinarios. La calidad del grano de esta variedad de maíz es producto de procesos empíricos de selección genética para conformar mazorcas eloteras, además no existen variedades mejoradas o híbridas. Su cultivo se basa en conocimientos tradicionales, trasmítidos de generación a generación dada su presencia de más de 50 años en la comunidad; el valor económico, nutricional, cultural y de manejo agrícola de esta variedad de maíz concuerda con Téllez Silva *et al.* (2016) para otra localidad en la entidad. En contraste, se encuentra la introducción de un cultivo de papa relativamente reciente, con poco más de 10 años de antigüedad como monocultivo, su introducción ha respondido a las necesidades de los agricultores de contar con mayores ingresos económicos, bajo esquemas de altos requerimientos de insumos agroquímicos en el proceso de producción, principalmente en las zonas altas de la comunidad.

Procesos de transformación en los sistemas agrícolas

A partir de las entrevistas realizadas a los productores de la comunidad de Zaragoza de Guadalupe, se identificaron dos procesos generales en los sistemas agrícolas que han incidido en la resiliencia de los suelos. El primero se enfoca a los cambios en los patrones de ocupación y

transformación del territorio local que han propiciado la sustitución de la vegetación primaria por sembradíos. En tal sentido, se encontró que el 66.6% de los entrevistados tienen fuerte arraigo por el cultivo de maíz con un tiempo promedio de 38 años desarrollando esta actividad, que manejan sistemas de producción con antigüedad fluctuante (desde 1 a más de 50 años). Sin embargo, en décadas recientes se ha presentado una sustitución del cultivo de maíz por cultivos comerciales altamente rentables como la papa, lo que representa una mayor fuente de ingresos como lo señala también Rebollar-Rebollar *et al.* (2019). Aproximadamente el 15% de los entrevistados han introducido estos cultivos comerciales a sus sistemas.

Un segundo proceso por resaltar es el cambio en el sistema de producción a partir de la venta de materiales volcánicos subyacente a las capas cultivables, denominados también como materiales pétreos, debido a su alta demanda por la industria de la construcción en la región por el incremento de la urbanización (Valencia *et al.* 2022). De acuerdo con los testimonios de los entrevistados, no venden el terreno sino solo los materiales pétreos que pueden extraerse debajo de la capa cultivable, estos materiales pueden alcanzar varios metros de profundidad como lo son los depósitos de roca pumicita. Las empresas compradoras en primera instancia remueven y confinan la capa arable del terreno, generalmente con mayor contenido de limos y arcillas, para que posteriormente y una vez extraído el material pétreo, pueda ser restituida la capa superficial de suelo, denominada extracción por método de transferencia, aunque esta última fase no siempre es atendida acentuando el deterioro de la funcionalidad del suelo.

Percepción local de amenazas e implementación de estrategias

Un aspecto interesante es que el 41% de los entrevistados no percibió amenaza en sus sistemas de producción. Si bien no todos los productores detectan abiertamente los indicios de degradación del suelo a consecuencia de las prácticas de manejo a que son sometidos, si perciben que las principales amenazas sobre la degradación física en sus tierras son los deslaves y cárcavas, principalmente en las zonas de ladera. El 56% identificó como las principales causas de degradación aquellas relacionadas con factores climáticos como precipitaciones extremas que inciden sobre los procesos erosivos. No obstante que la degradación física y química del suelo no se percibe como una amenaza por los entrevistados, los agricultores reportan la implementación de estrategias de manejo como la aplicación de insumos externos, como una medida para mantener o bien elevar los rendimientos en sus cultivos. Al respecto, Karim *et al.* (2023) señalan que la percepción de productores de papa sobre degradación del suelo es el problema de degradación física, centrado en el riesgo de disminución de la cosecha y en como incrementar la fertilidad de las plantas. Sin embargo, los productores de Calimaya se enfocan a mantener la productividad incrementando los insumos de agroquímicos, y no expresaron intenciones de cambio en sus sistemas de labranza.

En el caso de aquellos productores que advierten problemas de degradación física en zonas de laderas responden con la construcción de obras artesanales como tinas ciegas para contener los sedimentos y captar agua. Se identificaron estrategias incipientes y limitadas para combatir los procesos de degradación de suelo, asociadas con falta de interés y/o de acceso a recursos técnicos y económicos, por lo que, se recurre al uso de recursos locales como llantas, costales rellenos o zanjas para controlar la erosión del suelo. En particular, se identificó la local llamada botones, que

consiste en poner una barrera de rastrojo de maíz como retenedora de suelo en varios puntos de la pendiente.

Evaluación de la calidad del suelo

El análisis de correlación de las variables edáficas (Tabla 3) mostró interacciones positivas que denotan el impacto del uso de suelo sobre sus propiedades físicas y químicas del suelo en la medida que se intensifica. Las correlaciones mayores se dan entre la condición de uso de suelo y la disponibilidad de nitrógeno total, fósforo asimilable y pH del suelo. Condiciones similares han sido reportadas por Martínez-Alba *et al.* (2015) para suelos agrícolas en ladera, puntualizando que las actividades agrícolas intensivas tienden a deteriorar gradualmente las propiedades del suelo como la reducción del contenido de materia orgánica y nitrógeno total, la porosidad y mayor erosión hídrica.

Tabla 3. Correlaciones de las variables edáficas

Correlaciones de las Variables transformadas

	Uso de suelo	Clase textural	Compactación superficial	Grado de erosión	pH del suelo	Nitrógeno total	Fósforo asimilable	Materia orgánica
Uso de suelo								
Clase textural	.345							
Compactación superficial	.545	.427						
Grado de erosión	.095	.327	.735*					
pH del suelo	.678*	.218	.542	-.167				
Nitrógeno total (ppm)	.65*	.218	.653	.500	.333			
Fósforo asimilable (ppm)	.651*	.218	.653	.500	.333			
Materia orgánica (%)	.468	.758	.294	.214	.168	.524	.524	
Dimensión	1	2	3	4	5	6	7	8
Autovalores	4.242	1.400	1.234	.823	.222	.076	.002	.000

El análisis de correspondencia múltiple (Figura 2), indicó que las dos primeras dimensiones, compuestas por las variables edáficas, modalidades de producción y tiempo de manejo tuvieron una explicación del 83% de la varianza total, lo cual indica alta eficiencia del modelo generado (Tabla 4). Se identificó la conformación de tres grupos en los que es evidente la relación entre el deterioro de las condiciones edáficas con el tiempo y condición de manejo. En el primer grupo se incluye los sistemas productivos MTL y MT-E y muestran el mayor deterioro para la calidad de las propiedades edáficas ubicándolas en rangos medios a bajos. En el segundo grupo se encuentra el sistema MT con rangos de moderados a buenos. El tercer grupo comprende el sistema CP vinculado a las mejores en cuanto a clase textural, estructura y porosidad y el tiempo con rangos en la condición de muy buenos.

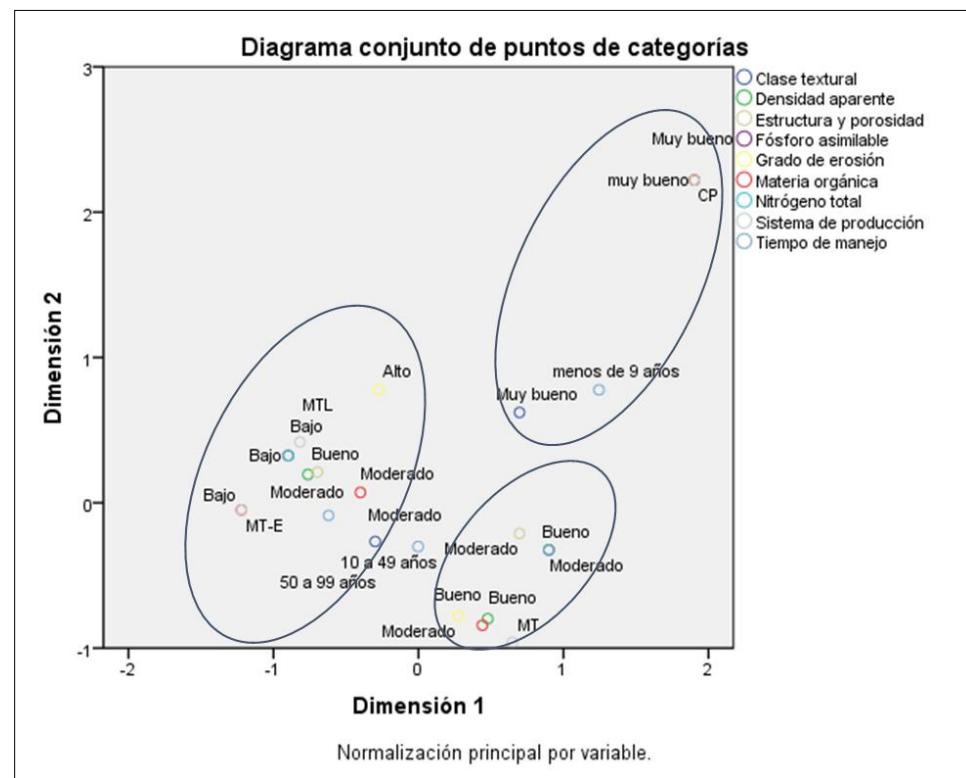


Figura 2. Análisis de correspondencia de las variables de calidad de suelo.

Tabla 4. Eficiencia del modelo de análisis de correspondencia múltiple.

Dimensión	Alfa de Cronbach	Varianza explicada		
		Total (Autovalores)	Inercia	% de la varianza
1	.873	4.242	.530	53.023 4
2	.667	2.402	.300	30.020
Total		6.643	.830	
Media	.799 ^a	3.322	.415	41.521

El Alfa de Cronbach Promedio está basado en los autovalores promedio.

El estudio de calidad del suelo indica que independientemente de la modalidad de sistema de producción, es posible advertir indicios moderados a severos de degradación física por erosión en el suelo, lo que pone en evidencia la pérdida del horizonte superficial con mayor contenido de materia orgánica y fracción mineral fina, y en su lugar se observa el afloramiento de un horizonte subyacente (MTL y MT-E). Otro aspecto es la pérdida de estructura y porosidad superficial, asociada a bajos contenidos de materia orgánica y mayor compactación por el laboreo continuo. Resultados similares a los encontrados por Alvarez-Arteaga *et al.* (2020) en cultivos de ladera de la región noroeste del Estado de México, lo que en casos extremos predispone la formación de costras superficiales con desarrollo débil, ocasionando mayor escorrentía en el suelo y con ello el incremento de la erosión hídrica. Algunos elementos denotan la diferencia entre los sistemas MT con respecto a MTL; en el caso del segundo, el sistema de cultivo en ladera favorece el incremento

de la erosión en extensión e intensidad sobre el terreno con implicaciones sobre la pérdida de materia orgánica y macronutrientes como nitrógeno total, (Nt), fósforo asimilable (P) y potasio (K). Los suelos con extracción previa de materiales pétreos (MT-E) presentan condición similar a los sitios MTL con rangos de moderados a bajos.

El sistema CP es un caso particular debido a la reciente incorporación de estas tierras a la agricultura, por ello permite identificar elementos propios de los suelos de referencia para la zona, los cuales son la presencia de un horizonte húmico profundo, elevados contenidos de materia orgánica y nutrientes, en comparación con los sistemas de cultivo de maíz. Los resultados del recorrido de campo, de los análisis físicos y químicos del suelo; denotan condiciones alarmantes, como incremento de la erosión hídrica ante la desaparición de la cubierta forestal, el laboreo excesivo, la formación de cárcavas y la aplicación de altos niveles de agroquímicos. El indicador de profundidad efectiva tiene el valor óptimo para todos los suelos, esto es común a los suelos provenientes de materiales piroclásticos como cenizas y tobas volcánicas en los que tales materiales están presentes a grandes profundidades, por lo tanto, no se consideró como un indicador contrastante entre los sitios.

Resiliencia de suelos agrícolas

Los cambios en las propiedades de estos suelos evidencian que la resiliencia disminuye en la medida en que se intensifican las actividades agrícolas y extractivas, el tiempo de producción de los sistemas agrícolas y la falta de adopción de medidas constantes y efectivas para disminuir la degradación física y química del suelo. Se observa que disminución de nutrientes del suelo, se compensa con la aplicación de fertilizantes inorgánicos por los productores. En los sistemas de cultivos estudiados no se identifica un elemento de resiliencia diferenciado, lo que coincide con Ludwing *et al.* (2018) que mencionan la necesidad de monitorear la parte arable del suelo y relacionarla con las prácticas de manejo con la finalidad de ajustar la funcionalidad integrativa de los suelos. En aquellas variables como la textura, su condición o valor dentro del sistema de evaluación disminuye en la medida en que se presentan texturas gruesas que retienen menor contenido de humedad y no forman compuestos organominerales en el suelo de tal forma que estabilicen la materia orgánica.

Los sistemas de producción estudiados predisponen presiones de degradación sobre las propiedades del suelo lo que implica disminución de calidad y en consecuencia de la resiliencia del suelo. Las respuestas actuales de las UFC, son a corto plazo con la aplicación de insumos inorgánicos para mantener la productividad y no en fortalecer la calidad de los suelos. El desplazamiento del cultivo de maíz por cultivos intensivos como la papa incide en la degradación del suelo, así como en la resiliencia a largo plazo. Bajo un escenario tendencial se contempla mayor afectación del cultivo de papa y de parcelas maíz con extracción debido a los procesos de intensificación agrícolas, prácticas limitadas de protección del recurso suelo y el incremento en la dependencia de insumos externos. Los indicadores evaluados muestran que la calidad del suelo influye en la disminución de la resiliencia, aunado el incremento de la demanda de materiales pétreos.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto de investigación “Resiliencia de sistemas de producción agrícola a la degradación del suelo desde el enfoque socioecológico territorial” clave 6183/2020CIB financiado por la Universidad Autónoma del Estado de México.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Abreu LGAH, Escalona VRA, Espinosa RLM, Juan PJI, Balderas PMÁ (2022) Contexto ambiental de los procesos de cambio de uso y cobertura del suelo en Calimaya, Altiplano Mexicano. *Revista Geográfica de América Central* 1(70): 221-241. <https://doi.org/10.15359/rgac.70-1.8>
- Álvarez-Arteaga G, Ibáñez-Huerta A, Orozco-Hernández ME, García-Fajardo B (2020) Regionalización de indicadores de calidad para suelos degradados por actividades agrícolas y pecuarias en el altiplano central de México. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales* 22(2): 5-19. <https://doi.org/10.36677/qret.v22i2.13302>
- Assarkhaniki Z, Rajabifard A, Sabri S (2020) The conceptualisation of resilience dimensions and comprehensive quantification of the associated indicators: A systematic approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 51: 101840. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101840>
- Ayuntamiento de Calimaya (2022) Medio físico Calimaya. <https://calimaya.gob.mx/tu-municipio/medio-fisico>. Municipio de Calimaya, México. Fecha de consulta 11 de Agosto de 2022.
- Bobadilla JG, Pérez LD, González HA, Sangerman-Jarquin D, Navarro BA (2019) Estudio preliminar para determinar diferencia y tamaño de muestra en maíz Cacahuacintle. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10: 1771-1782. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i8.1765>
- Buitenhuis Y, Candel LJJ, Termeer JAMK, Feindt HP (2020) Does the common agricultural policy enhance farming systems' resilience? Applying the resilience assessment tool (ResAT) to a farming system case study in the Netherlands. *Journal of Rural Studies* 80: 314-327
- Castillo-Valdez X, Etchevers JD, Hidalgo-Moreno C, Aguirre-Gómez A (2021) Evaluación de la calidad del suelo: generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana* 39: 1-12. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.698>
- Chatterjee R, Acharya SK, Biswas A, Mandal A, Biswas T, Das S, Mandal B (2021) Conservation agriculture in new alluvial agro-ecology: Differential perception and adoption. *Journal of Rural Studies* 88: 14-27. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.10.001>
- Dardonville M, Bockstaller C, Villerod J, Therond O (2022) Resilience of agricultural systems: biodiversity-based systems are stable, while intensified ones are resistant and high-yielding. *Agricultural Systems* 197: 103365. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103365>
- Food and Agriculture Organization of United Nations (2008) Visual soil assessment. Field Guides FAO. <https://www.fao.org/4/i0007e/i0007e00.htm>. Fecha de consulta: 11 de Agosto de 2022.

- Fanchone A, Alexandre G, Chia E, Diman JL, Ozier-Lafontaine H, Angeon V (2020) A typology to understand the diversity of strategies of implementation of agroecological practices in the French West Indies. *European Journal of Agronomy* 117: 126058. <https://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2020.126058>
- Ibarrola-Rivas MJ, Castillo G, González J (2020) Social, economic and production aspects of maize systems in Mexico. *Investigaciones Geográficas* 102: 1-18.
- Insituto Nacional de Estadistica y Geografía (2010) Compemdio de informacion geográfica municipal 2010 Calimaya. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Karim AR, Darsono, Harisudin M, Dharmawan B (2023) Potato cultivation on the west slope of Mount Slamet: millennial farmers perceptions and intentions for conservation-based farming. *IOP Conference Series.: Earth Environmental Sciences* 1180. <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1180/1/012054>
- López Mejía FX, Muñoz Flórez JE, Vivas Cedeño JS, Cedeño Zambrano JR, Tacuri Troya E, Cruzatty Loor NM (2022) Caracterización de agrosistemas productores de plátano (*Musa AAB*) en los cantones Santo Domingo y El Carmen, Ecuador. *Idesia* 40(4): 45-52. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292022000400045>
- Ludwing M, Wilmes P, Scharader S (2018) Measuring soil sustainability via soil resilience. *Science of the Total Environment* 626: 1484-1493. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.043>
- Martínez-Alba G, Gutierrez-Ruiz, Martínez-Campos A.R, Villalobos Pietrini R, Arteaga-Reyes TT (2015) Concentracion total y geodisponible de elementos potencialmente tóxicos en suelos volcánicos con uso agrícola del Nevado de Toluca, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 31(2): 113-125.
- Mathijs E, Wauters E (2020) Making farming systems truly resilient rendre les systèmes agricoles vraiment résilients Landwirtschaftssysteme wirklich resilient machen. *EuroChoices* 19: 72-76. <https://doi.org/10.1111/1746-692X.12287>
- Meuwissen MPM, Feindt PH, Slijper T, Spiegel A, Finger R, Y. de Mey, Paas W, Termeer KJAM, Poortvliet PM, Peneva M, Urquhart , J. Vigani M, Black , JEP, Davies N, Maye D, Appel F, Heinrich F, Balmann A, Bijtебier J, Coopmans I, Wauters E, Mathijs E, Hanssny H, Lagerkvist CJ, Rommel J, Manevska-Tasevska G, Accatino F, Pineau C, Soriano B, Bardaji I, Severini S, Senni S, Zinnanti C, Gavrilescu C, Bruma IS, Dobay KM, Matei D, Tanasa L, Voicilas DM, Zawalińska K, Gradziuk P, Krupin V, Martikainen A, Herrera H, Reidsma P (2021) Impact of Covid-19 on farming systems in Europe through the lens of resilience thinking. *Agricultural Systems* 191: 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jagsy.2021.103152>
- Min-Suk K, Hyun-Gi M, Seung-Hun H, Jeong-Gyu K (2020) Soil resilience and threat factors related to agricultural environment. *Ecology and resilient infrastructure* 71: 26-46. <https://doi.org/10.17820/eri.2020.7.1.02>
- Paas W, San Martín C, Soriano B, van Ittersum KM, Meuwissen PMM, Reidsma P (2021) Assessing future sustainability and resilience of farming systems with a participatory method: A case study on extensive sheep farming in Huesca, Spain. *Ecological Indicators* 132: 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108236>
- Rebollar-Rebollar E, Rebollar-Rebollar A, Rebollar-Rebollar S, Hernández-Martínez J, Gómez-Tenorio G, González-Razo FJ (2019) Participacion y especialización de los granos de consumo pecuario en México, 2003-2013. *Agricultura Sociedad y Territorio* 16: 141-158. <https://doi.org/10.22231/asyd.v16i2.1004>
- Soares Franco HH, Locks Guimarães RM, Tormena CT, Maurício Cherubin MR, Sasso Favilla H (2019) Global applications of the Visual Evaluation of Soil Structure method: A systematic review and meta-analysis. *Soil and Tillage Research* 190: 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.002>

Téllez-Silva JM, Herrera-Tapia F, Vizcarra-Bordi I, Ramírez -Hernández JJ (2016). El maíz cacahuacintle y su potencial para el desarrollo endógeno: el caso de Santa María Nativitas. Espacialidades. Revista de Temas Contemporáneos sobre Lugares, Política y Cultura 6(1): 168-191.

Valencia García EJ, Juan Pérez JJ y Estrada Olivella R (2022) Recuperación ambiental y bienestar social en México: El caso de Calimaya, Estado de México. Revista Desarrollo Local Sostenible 9(25).