



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

IMPACTO DE OBRAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA SOBRE LA PRODUCTIVIDAD AGRÍCOLA Y CALIDAD EDÁFICA EN TLAXCALA

HUGO LARIOS TLALI

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2020

La presente tesis titulada: "**Impacto de obras de conservación de suelo y agua sobre la productividad agrícola y calidad edáfica en Tlaxcala**", realizada por el alumno: "**Hugo Larios Tlali**", bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. FRANCISCO GAVI REYES

ASESOR



DR. HERMILIO NAVARRO GARZA

ASESOR



DR. DIEGO FLORES SÁNCHEZ

ASESOR



DR. ENRIQUE RUBIÑOS PANTA

ASESOR



DR. ABEL QUEVEDO NOLASCO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, octubre de 2020

IMPACTO DE OBRAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA SOBRE LA PRODUCTIVIDAD AGRÍCOLA Y CALIDAD EDÁFICA EN TLAXCALA

Hugo Larios Tlali, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2020

RESUMEN

En México, la técnica habitual de afrontar los problemas de erosión y la baja productividad de parcelas agrícolas consiste en construir obras de conservación de suelo y agua; sin embargo, a pesar del extenso uso de estas prácticas, los reportes disponibles no incluyen su efecto cuantitativo en la calidad del recurso edáfico. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el impacto de obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala, sobre la fertilidad química y rendimiento agrícola. Para ello, se identificó, delimitó y clasificó –en imágenes satelitales y dentro del programa operativo ArcGis 10.3–, áreas con presencia de obra; obteniéndose 2,469 polígonos que se clasificaron en: conservación forestal, agricultura con obra siguiendo curvas a nivel, parcela perpendicular a la pendiente, y área urbana con parcelamientos. Al universo de estas obras se aplicó un sistema de muestreo estatificado (con 92% de confianza) para obtener el número de muestra: 16 polígonos con obra [CO]. El método de comparación de parcelas pareadas requirió la selección adicional de 16 polígonos sin obra [SO], la cual se hizo mediante técnicas de percepción remota. Las 32 parcelas se evaluaron a través de indicadores socioeconómicos (sistemas de cultivo y rendimiento agrícola) y ambientales (niveles de fertilidad química del suelo). Los sistemas de cultivo entre parcelas CO y SO no se diferenciaron ($p \leq 0.01$) considerando las labores culturales que los agricultores implementan en sus parcelas. Las obras de conservación de suelo y agua tienden a incrementar el rendimiento de grano de maíz y los valores de los índices de fertilidad química del suelo en 7% ($p=0.717$) y 15% ($p=0.669$), respectivamente.

Palabras Clave: Obras de conservación de suelo y agua, muestreo estratificado, parcelas pareadas, evaluación, indicadores.

IMPACT OF SOIL AND WATER CONSERVATION WORKS ON AGRICULTURAL PRODUCTIVITY AND SOIL QUALITY IN TLAXCALA

Hugo Larios Tlali, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2020

ABSTRACT

In Mexico, a common technique to deal with erosion problems and the low productivity of agricultural areas is by building soil and water conservation works; however, despite the extensive use of these structural measures, the available reports do not include the quantitative effect on soil quality. The objective of the present investigation was to evaluate the impact of soil conservation works in Tlaxcala, on chemical fertility and agricultural corn yield. To do this, areas with presence of work were identified, delimited and classified through satellite images and ArcGis 10.3 operating program; this process generated 2,469 polygons, which were classified as follows: forest conservation, agriculture with work following contour lines, plot perpendicular to the slope, and urban area with plots. A stratified sampling system (with 92% confidence) was applied to the universe of these conservations works, which established a sample size of 16 polygons. Inside this agricultural plots were identified [CO]. To use the paired parcel comparison method, 16 more polygons without work [SO] were chosen using remote sensing techniques. The 32 paired plots were evaluated through socioeconomic (cultivation systems and agricultural yield) and environmental indicators (parameters of chemical soil fertility). Regarding cultivation systems, no significant difference ($p \leq 0.01$) between CO and SO plots was observed when considering type of cultural tasks that farmers implement in their plots. Soil and water conservation works tend to increase the corn grain yield and the values of the chemical soil fertility indices by 7% ($p = 0.717$) and 15% ($p = 0.669$), respectively.

Keywords: Soil and water conservation works, stratified sampling, paired plots, evaluation, indicators.

Dedico este trabajo por su amor y paciencia, a Yeri y Salomón.

Por gratitud y reconocimiento, a mamá y papá: Leti y René.

AGRADECIMIENTOS:

Al G.:A.:D.:U.: por su bendición.

Al pueblo de México, cuyas contribuciones permiten la operación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) y el financiamiento de esta investigación.

Al Colegio de Postgraduados y al Postgrado en Hidrociencias, por transmitir su conocimiento y compartir su espacio.

Al Dr. Mario Roberto Martínez Menes (D.E.P.) por su amistad y haberme guiado en esta línea de investigación. Al Dr. Francisco Gavi Reyes por su dirigencia. Al Dr. Hermilio Navarro Garza por sus enseñanzas. Al Dr. Diego Flores Sánchez por los aportes fundamentales. Al Dr. Enrique Rubiños Panta por su orientación. Al Dr. Humberto Vaquera Huerta por la asesoría y al Dr. Abel Quevedo Nolasco por su disposición.

A los Ingenieros Francisco J. Cocoltzi Pérez y Raquel Ramírez Castillo por su colaboración, y a los campesinos del estado de Tlaxcala, quienes me brindaron información, tiempo y confianza, elementos fundamentales para este proyecto.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE CUADROS	xi
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO I. INVENTARIO DE OBRAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA EN TLAXCALA	8
1.1 RESUMEN	8
1.2 ABSTRACT	9
1.3 INTRODUCCIÓN	10
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS	13
Zona de estudio	13
Identificación, delimitación y clasificación de obras	13
Integración de la Base de Datos	16
1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
Base de Datos del inventario	19
Caracterización de obras en gabinete	22
Análisis de consistencia de información	25
1.6 CONCLUSIONES	28
1.7 REFERENCIAS	28
CAPÍTULO II. USO DE SIG Y DISEÑO MUESTRAL ESTRATIFICADO PARA EVALUAR OBRAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA	33
2.1 RESUMEN	33
2.2 ABSTRACT	34
2.3 INTRODUCCIÓN	35
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS	38
Inventario de obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala	38
Fundamento estadístico del sistema de Muestreo Estratificado	39
Uso de SIG en el diseño muestral	41

2.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
	Sistema de Muestreo Estratificado.....	49
	Muestreo Simple Aleatorio y de Proporciones con Varianza Máxima	50
	Comparación entre los sistemas de muestreo	51
2.6	CONCLUSIONES.....	52
2.7	REFERENCIAS.....	53
CAPÍTULO III. CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA EN TLAXCALA Y SU IMPACTO SOBRE LA PRODUCTIVIDAD AGRÍCOLA Y FERTILIDAD EDÁFICA		58
3.1	RESUMEN	58
3.2	ABSTRACT	59
3.3	INTRODUCCIÓN	60
3.4	MATERIALES Y MÉTODOS	64
	Zona de estudio y tipo de obra.....	64
	Sistema de Muestreo Estratificado.....	67
	Selección de Indicadores de evaluación	70
	Obtención de los indicadores ambientales y socioeconómicos.....	71
	Análisis del factor clima.....	72
	Pruebas estadísticas de asociación y comparación	74
3.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	75
	Región Volcán La Malinche.....	75
	Región Altiplano de Tlaxcala.....	86
3.6	CONCLUSIONES.....	97
3.7	REFERENCIAS.....	98
CONCLUSIONES GENERALES.....		104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Localización del estado de Tlaxcala.....	13
Figura 1.2. Mapa de pendientes del estado de Tlaxcala.	14
Figura 1.3. Mapa de curvas a nivel del estado de Tlaxcala.....	15
Figura 1.4. Distribución de los polígonos con obra de conservación elegidos para el proceso de Análisis de consistencia de información.	19
Figura 1.5. Mapa del Inventario de obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala.....	20
Figura 1.6. Ejemplo de polígono de Conservación forestal.	23
Figura 1.7. Ejemplo de polígono de Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel.	24
Figura 1.8. Ejemplo de polígono de Parcela perpendicular a la pendiente.	25
Figura 1.9. Evidencia fotográfica de obras de Conservación forestal.....	26
Figura 1.10a. Evidencia fotográfica de terraza de banco.	26
Figura 1.10b. Evidencia fotográfica de terraza de formación sucesiva.	26
Figura 1.11. Evidencia fotográfica de Parcela perpendicular a la pendiente.....	27
Figura 1.12. Inventario de obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala visualizado en la Plataforma de Google Earth Pro.	28
Figura 2.1. Mapa de pendientes del estado de Tlaxcala.	42
Figura 2.2. Mapa reclasificado de pendientes del estado de Tlaxcala.	43
Figura 2.3. Polígonos de las Regiones geográficas Altiplano de Tlaxcala y Volcán La Malinche.....	44
Figura 2.4. Pendientes de las Regiones Altiplano de Tlaxcala y Volcán La Malinche.	45
Figura 2.5. Mapa de pendientes dominantes en las Regiones Altiplano de Tlaxcala y Volcán La Malinche.	46
Figura 2.6. Geoformas que constituyen los estratos de muestreo.	46
Figura 2.7. Distribución de los estratos y polígonos con obra.	47
Figura 2.8. Distribución de los perfiles de INEGI (2013b) en el estado de Tlaxcala.	49

Figura 3.1. Polígonos de las Regiones geográficas Altiplano de Tlaxcala y Volcán La Malinche.	65
Figura 3.2. Geoformas que constituyen los estratos de muestreo.	66
Figura 3.3. Distribución de la población de estudio en las Regiones Altiplano de Tlaxcala y Volcán La Malinche.	67
Figura 3.4. Distribución de las 32 parcelas pareadas en las Regiones geográficas.	69
Figura 3.5. Distribución de las estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis de precipitación y su relación en el rendimiento agrícola.	74
Figura 3.6. Itinerarios técnicos en parcelas con obra (arriba) y sin obra (abajo), región Volcán La Malinche.	75
Figura 3.7. Comparación de los Itinerarios técnicos entre parcelas con obra y sin obra, región Volcán La Malinche.	76
Figura 3.8. Periodo de ejecución de prácticas agrícolas en parcelas con obra [CO] y sin obra [SO], región Volcán La Malinche.	81
Figura 3.9. Rendimientos de maíz estimados en la región Volcán La Malinche. ..	83
Figura 3.10. Distribución espacial de la Precipitación Promedio Mensual ponderada del año 2018 en la región Volcán La Malinche.	85
Figura 3.11. Precipitación Promedio Mensual (1951-2010 y ponderada del año 2018) de la región Volcán La Malinche.	86
Figura 3.12. Itinerarios técnicos en parcelas con obra (arriba) y sin obra (abajo), región Altiplano de Tlaxcala.	87
Figura 3.13. Porcentajes en que se ejecutan las prácticas agrícolas en parcelas con obra y sin obra, región Altiplano de Tlaxcala.	88
Figura 3.14. Periodo de ejecución de prácticas agrícolas en parcelas con obra [CO] y sin obra [SO], región Altiplano de Tlaxcala.	91
Figura 3.15. Rendimientos estimados en la región Altiplano de Tlaxcala.	93
Figura 3.16. Distribución espacial de la Precipitación Promedio Mensual ponderada del año 2018 en la región Altiplano de Tlaxcala.	95
Figura 3.17. Precipitación Promedio Mensual (1951-2010 y ponderada del año 2018) de la región Altiplano de Tlaxcala.	96

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1. Tipos y número de polígonos del Inventario de obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala.....	20
Cuadro 1.2. Base de Datos del Inventario de obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala.....	21
Cuadro 2.1. Tipos y número de polígonos con obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala.	39
Cuadro 2.2. Capas de información geográfica del Mapa Base.	41
Cuadro 2.3. Número de polígonos con obra, por estrato y Región geográfica.....	47
Cuadro 2.4. Porcentaje de carbono orgánico y materia orgánica de los perfiles de INEGI (2013b).	48
Cuadro 2.5. Tamaño de la muestra por estrato y Región geográfica, con el sistema de Muestreo Estratificado.....	50
Cuadro 2.6. Tamaño de la muestra por estrato y Región geográfica, con el sistema de Muestreo Simple Aleatorio y de Proporciones con Varianza Máxima.	51
Cuadro 3.1. Tipos y número de polígonos con obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala.	65
Cuadro 3.2. Número de polígonos con obra, por estrato y Región geográfica.....	67
Cuadro 3.3. Metadatos de las 32 parcelas pareadas.	69
Cuadro 3.4. Estaciones meteorológicas distribuidas en la zona de estudio.....	72
Cuadro 3.5. Estaciones meteorológicas con información de precipitación (año 2018) utilizadas para interpolar la distribución espacial de la lluvia.	73
Cuadro 3.6. Características de fertilización en la región Volcán La Malinche.	78
Cuadro 3.7. Aplicación de herbicidas en la región Volcán La Malinche.	79
Cuadro 3.8. Resultados de análisis de suelo de la región Volcán La Malinche. ...	82
Cuadro 3.9. Precipitación Promedio Mensual ponderada del año 2018 en la región Volcán La Malinche.	84
Cuadro 3.10. Precipitación Promedio Mensual (1951-2010) de las estaciones meteorológicas distribuidas dentro de la región Volcán La Malinche.	84
Cuadro 3.11. Características de fertilización en la región Altiplano de Tlaxcala. ..	89

Cuadro 3.12. Aplicación de herbicidas en la región Altiplano de Tlaxcala.	90
Cuadro 3.13. Resultados de análisis de suelo de la región Altiplano de Tlaxcala.	92
Cuadro 3.14. Precipitación Promedio Mensual ponderada del año 2018 en la región Altiplano de Tlaxcala.	94
Cuadro 3.15. Precipitación Promedio Mensual (1951-2010) de las estaciones meteorológicas distribuidas dentro de la región Altiplano de Tlaxcala.	95

INTRODUCCIÓN GENERAL

El estado de Tlaxcala se localiza en la región centro-oriental de la República Mexicana, entre los 19°05'43" y 19°44'07" latitud norte y 97°37'07" y 98°42'51" longitud oeste; su extensión territorial es de aproximadamente 4,060.93 km², lo que representa el 0.2% del territorio nacional, donde habitan 1,169,936 personas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2011).

El 80% de la superficie estatal comprende áreas agrícolas, pastizal inducido y asentamientos humanos, sólo el 20% está cubierto de vegetación natural (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2014). Esta alteración del ambiente se agudiza con la degradación del recurso edáfico. Alvarado (2000) señala que el 90% de su territorio presenta erosión en diferentes tipos, formas y grados, predominando la forma hídrica laminar con grado muy fuerte.

Con el propósito de enfrentar la degradación del suelo en las zonas más vulnerables del estado, el gobierno federal invirtió entre 2011 y 2014, 30.5 millones de pesos [mdp] para construir 48 bordos de tierra, 30 terrazas, ocho tanques de almacenamiento y dos ollas de agua (CuartodeGuerra, 2016). A pesar de éstas acciones la degradación del suelo y la baja producción agrícola son problemas recurrentes, ya que tampoco existe un instrumento de evaluación que permita conocer cuantitativamente el impacto de estas medidas estructurales.

Por lo anterior, en la presente investigación se evaluaron las obras de conservación de suelo y agua en dos regiones del estado de Tlaxcala mediante la valoración de indicadores socioeconómicos (sistema de cultivo y rendimiento agrícola) y de fertilidad edáfica (pH, CE, N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y materia orgánica [MO]). Se analizó una muestra representativa de la población total de obras, la cual fue establecida a través de un sistema de muestreo estratificado con 92% de confianza (Jiménez, 2001; Bai *et al.*, 2013). Como enfoque innovador de evaluación se usó el

sistema de parcelas pareadas en el que se comparan parcelas con y sin obra (Jiménez, 2010; Hailu *et al.*, 2012; Moradi *et al.*, 2015).

Planteamiento del problema

La erosión del suelo es un problema ambiental que se manifiesta como pérdida de suelo, nutrientes y contaminantes de las áreas agrícolas, ganaderas y forestales, que pueden azolvar, contaminar y eutrofizar los cuerpos de agua superficial (Boddy *et al.*, 1988; Christensen, 1989; Hillel, 1992; Van Der Knijff *et al.*, 2000; Holz *et al.*, 2016). Esto también genera problemas socioeconómicos como el derivado de la disminución de nutrientes y consecuentemente del rendimiento agrícola, que aumenta la necesidad de aplicar una mayor cantidad de agroquímicos.

Tlaxcala ocupa el séptimo lugar a nivel nacional en problemas de erosión (Saldaña y Conde, 2003), lo cual puede estar contribuyendo a la insuficiencia en producción de maíz que sólo cubre la mitad de su consumo (Colegio de Tlaxcala [CT], 2010; INEGI, 2009); y con la carencia alimenticia que padece 24% de su población (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], 2012).

La técnica habitual de afrontar los problemas de erosión y baja productividad de zonas agrícolas es la construcción de obras de conservación de suelo y agua. Estas prácticas han sido usadas extensivamente en México; sin embargo, a pesar de las evaluaciones, se desconoce su efecto cuantitativo en la solución de dichos problemas. Los reportes disponibles carecen de parcela testigo, y por lo tanto sus conclusiones incluyen elementos cualitativos sobre el cumplimiento de sus principales metas: mejorar la calidad del suelo y beneficiar a los usuarios del área intervenida.

Por lo anterior, en el presente estudio se evaluaron obras de conservación de suelo y agua mediante: muestreo estratificado con 92% de confianza (Jiménez, 2001; Bai *et al.*, 2013) que genera un tamaño de muestra confiable menor al usado en las

evaluaciones tradicionales de México (CP, 2004; CONAFOR, 2005a; CONAFOR, 2005b; CONAFOR, 2005c; UACH, 2007; CP, 2008; UACH, 2009); uso del sistema de parcelas pareadas que permite comparar características de dos zonas contiguas, una con obra y otra sin, en las que diversos factores son similares (Jiménez, 2010; Hailu *et al.*, 2012; Moradi *et al.* 2015); e indicadores socioeconómicos y de fertilidad edáfica.

El conocimiento generado sobre la efectividad de estas obras es útil en la solución de los problemas de erosión y productividad agrícola. Se espera que dicho conocimiento coadyuve en el diseño de alternativas para optimizar el establecimiento y mantenimiento de las obras de conservación, en la promoción del aprovechamiento racional de los recursos naturales y en la implementación de acciones gubernamentales en el corto, mediano y largo plazo.

Objetivos

General

Evaluar el impacto de las obras de conservación de suelo y agua en el estado de Tlaxcala sobre la fertilidad química del suelo y rendimiento agrícola, mediante muestreo estratificado y sistema de parcelas pareadas.

Particulares

- Identificar y caracterizar las obras de conservación de suelo y agua establecidas en el estado de Tlaxcala.
- Diseñar y aplicar un sistema de muestreo a la población total de obras de conservación de suelo y agua, que permita obtener información eficiente y confiable a partir de un número pequeño de muestras.
- Analizar el impacto de obras de conservación de suelo y agua sobre la fertilidad química del suelo, el rendimiento agrícola y los sistemas de cultivo mediante muestreo estratificado y parcelas pareadas.

Hipótesis

General

Los valores de fertilidad química del suelo y rendimiento agrícola son superiores en parcelas con obra, y existen diferencias en las prácticas culturales que se realizan en parcelas con obra y sin obra.

Particulares

- El uso de sistemas de información geográfica y percepción remota permite la caracterización y medición del 100% de la superficie influenciada por obras de conservación de suelo y agua establecidas en el estado de Tlaxcala.
- Aplicar un sistema de Muestreo Estratificado al universo de obras de conservación de suelo y agua, reduce a la mitad el tamaño de la muestra en relación con el muestreo Simple Aleatorio y el de Proporciones con Varianza Máxima.
- Las obras de conservación de suelo y agua en parcelas agrícolas incrementan la fertilidad química edáfica y el rendimiento de maíz.

Literatura Citada

- Alvarado, C.M. (2000). *Diagnóstico de la erosión hídrica en el estado de Tlaxcala*. Michoacán, México: Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales A.C.
- Alvarez, R., Steinbach, H.S., Alvarez, C.R., & Grigera, S. (2003). Recomendaciones para la fertilización nitrogenada de trigo y maíz en la pampa ondulada. *Informaciones Agronómicas*, 18:14-19.
- Arias, M.E., González, P.J.A., González, V.F.J., & Ball, A.S. (2005). Soil health-a new challenge for microbiologists and chemists. *International Microbiology*, 8(1),13-21. DOI:10.2436/im.v8i1.9493
- Bai, X., Tsiatis, A.A., & O'Brien, S.M. (2013). Doubly-robust estimators of treatment-specific survival distributions in observational studies with stratified sampling. *Biometrics*, 69(4),830-9. DOI: 10.1111/biom.12076.

- Boddy, L., Watling, R., & Lyon, A.J.E. (eds.). (1987). *Fungi and ecological disturbance*. Edinburgh, Scotland: University of Sheffield.
- Christensen, M. (1989). A view of fungal ecology. *Mycologia*, 81(1), 1–19. DOI: 10.2307/3759446.
- Colegio de Tlaxcala A. C. (2010). *Los Grandes Problemas de Tlaxcala* (Diapositiva de PowerPoint). Recuperado de: <http://www.coltlax.edu.mx/sintegral/comun/pdf/Tlaxcala-tlaxcalt.pdf>.
- CONAFOR. (2005a). *Evaluación del Programa de Conservación y Restauración de Ecosistemas Forestales [PROCOREF] 2004*. México: Comisión Nacional Forestal.
- CONAFOR. (2005b). *Evaluación del Programa de Ordenamiento y Fortalecimiento a la Autogestión Silvícola [PROFAS] 2004*. México: Comisión Nacional Forestal.
- CONAFOR. (2005c). *Evaluación del Programa de Pago de servicios ambientales por captura de carbono y los derivados de la biodiversidad y para fomentar el establecimiento y mejoramiento de sistemas agroforestales [PSA-CABSA], Reporte final, Ejercicio fiscal 2004*. México: Comisión Nacional Forestal.
- CONAFOR. (2010). *Informe de Evaluación Externa de los Apoyos de Reforestación Ejercicio Fiscal 2009*. México: Comisión Nacional Forestal.
- CP. (2004). *Evaluación del Programa de Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos [PSAH]*. Texcoco, México: Colegio de Postgraduados.
- CP. (2008). *Evaluación Externa de Obras de Restauración de Suelos Forestales, Ejercicio Fiscal 2007 (Evaluación de apoyos 2004-2006)*. Texcoco, México: Colegio de Postgraduados.
- CuartodeGuerra. (2016). *Benefician en Tlaxcala a mil productores con conservación de suelo y agua*. México: SN Digital Tlaxcala. Recuperado de: <http://elcuartodeguerra.com/index.php/actualidad1-2/24303-beneficia-gobierno-de-tlaxcala-a-mil-productores-con-conservacion-de-suelo-y-agua.html>.
- Domenech, J.M. (1999). *Métodos Estadísticos en Ciencias de la Salud*. Barcelona, España: Editorial Gráficas Signo.
- FAO. (SA). *Selección de semilla de maíz*. Bolivia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Hailu, W., Moges, A., & Yimer F. (2012). The Effects of "Fanya juu" Soil Conservation Structure on Selected Soil Physical & Chemical Properties: the Case of Goromti Watershed, Western Ethiopia. *Resources and Environment*, 2(4), 132-140. DOI: 10.5923/j.re.20120204.02.
- Hillel, D. (1992). *Out of the Earth: Civilization and the Life of the Soil* (1st ed.). New York, United States of America: University of California Press.

- Houghton, R.A., Hackler, J.L., & Lawrence, K.T., (1999). Carbon budget: contributions from land-use change. *Science*, 285, 574-578. DOI:10.1126/science.285.5427.574.
- Holz, D.J., Williard, K.W.J., Edwards, P.J., & Schoonover, J.E. (2015). Soil erosion in humid regions: a review. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 154, 48-59.
- INEGI. (2009). *Resultados del VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2011). *Censo de Población y Vivienda 2010*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Jiménez, B.C. (2010). *Evaluación de obras de conservación de suelos en el Distrito de Coixtlahuaca (Oaxaca, México) y bases para actuaciones futuras* (tesis de licenciatura). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Jiménez, V.J. (2001). Métodos estadísticos. En: Lacasa, A., Humet, C., & Cot, R. (edt.). *Errores de Medicación Prevención, diagnóstico y tratamiento* (125-142). Barcelona, España: EASO.
- Kelsey, J.L., Tompson, W.D., & Evans, A.S. (1986). *Methods in observational epidemiology*. New York, United States of America: Oxford University Press.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304: 1623-1627. DOI: 10.1126/science.1097396
- María R., A. (1997). *Potencial productivo de maíz en la región oriente del estado de Tlaxcala* (tesis de maestría). Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México.
- Moradi, A., Teh Boon, S.C., Joo, G.K., Mohd, H.A.H., & Fauziah, I.C. (2015). Effect of four soil and water conservation practices on soil physical processes in a non-terraced oil palm plantation. *Soil and Tillage Research*, 145, 62–71. DOI: 10.1016/j.still.2014.08.005.
- Nieves, F.J.L. (1995). *Modelos de simulación para la estimación del rendimiento potencial del cultivo de maíz en el ejido de Atenco, México* (tesis de maestría). Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.
- Rao, I.M. (2009). *Essential plant nutrients and their functions*. Working Document No. 36. Cali, Colombia: CIAT.
- SAGARPA. (2012). *Panorama de Seguridad Alimentaria y Nutricional en México 2012*. México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Saldaña, M., & Conde, J. (3 de abril de 2003). Ocupa Tlaxcala el primer lugar nacional en deterioro ambiental. *El Sol de Tlaxcala*.
- SEMARNAT. (2014). *Inventario estatal forestal y de suelos, Tlaxcala 2014*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- UACH. (2007). *Evaluación de los Apoyos de Reforestación, Obras y Prácticas de Conservación de Suelos y Sanidad Forestal*. Texcoco, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- UACH. (2009). *Informe de Evaluación Externa de los Apoyos de Restauración de Suelos Forestales, Ejercicio Fiscal 2009*. Texcoco, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Van Der Knijff, J.M., Jones, R.J.A., & Montanarella, L. (2000). *Soil Erosion Risk Assessment in Europe* (1st ed.). Luxembourg: European Soil Bureau.
- Villalpando, I.J.F. (1975). *Desarrollo de un método para obtener ecuaciones empíricas generalizadas del rendimiento en una región agrícola, para uso en diagnóstico* (tesis de maestría). Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.
- Volke, H.V. (1981). *Estimación de funciones de producción mediante regresión en experimentos con fertilizantes y densidad de plantas, con fines de determinación de óptimos económicos*. Texcoco, México: Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo.

CAPÍTULO I. INVENTARIO DE OBRAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA EN TLAXCALA

1.1 RESUMEN

Una técnica habitual de afrontar los problemas de erosión en México es construir obras de conservación de suelo y agua, sin embargo, a pesar de su extenso uso no se conoce con precisión el tipo de obra, características y su ubicación geográfica. El objetivo del presente estudio fue general un inventario de estas prácticas para el estado de Tlaxcala mediante el uso de sistemas de información geográfica [SIG]. Primero se identificó y delimitó sobre las imágenes satelitales áreas con presencia de obra. Posteriormente se clasificaron y midieron parámetros morfológicos (longitud, intervalos y superficie intervenida), actividad que aplicó a una muestra extraída del total de polígonos delimitados (por el muestreo de Proporciones con Varianza Máxima, con 90% de confianza y 10% de error). Se verificaron los parámetros medidos en ArcGis 10.3 y amplió la caracterización de obras a través de un Análisis de consistencia de información mediante 20 puntos de entrenamiento. El resultado fueron 2,469 polígonos digitalizados que suman 1,933 km² (48% del territorio estatal), superficie clasificada en cuatro tipos de obra: conservación forestal (226 km²), agricultura con obra siguiendo curvas a nivel (1,127 km²), parcela perpendicular a la pendiente (416 km²) y área urbana con parcelamientos (164 km²).

Palabras clave: erosión, obras de conservación de suelo y agua, inventario, sistemas de información geográfica.

INVENTORY OF SOIL AND WATER CONSERVATION WORKS IN TLAXCALA

1.2 ABSTRACT

A common technique to deal with erosion problems in Mexico is to build soil and water conservation works, however, despite its extensive use, the type of work, characteristics and its geographical location are not precisely known. The objective of the present study was a general inventory of these works for the state of Tlaxcala through the use of geographic information systems [GIS]. First, areas with work presence were identified and delimited on satellite images. Subsequently, morphological parameters (length, intervals and operated area) were classified and measured, an activity that was applied to a sample drawn from the total of delimited polygons (by sampling Proportions with Maximum Variance, with 90% confidence and 10% error). The parameters measured in ArcGis 10.3 were verified and the characterization of works was extended through an Information Consistency Analysis using 20 training points. The outcome was 2,469 polygons digitalized, which together add up to 1,933 km² (48% of the state territory). This area was classified in four types of conservation works: forest conservation (226 km²), agriculture with work following curves at level (1,127 km²), plot perpendicular to the slope (416 km²) and urban area with plots with (164 km²).

Keywords: erosion, soil and water conservation works, inventory, geographic information systems.

1.3 INTRODUCCIÓN

El suelo es uno de los biomateriales más complejos de la Tierra (Young y Crawford, 2004), es un sistema dinámico generador de múltiples funciones (Blum, 2005; CEC, 2006) que apoyan en la prestación de servicios ecosistémicos (Hannam y Boer, 2004), los servicios del suelo dependen de sus propiedades e interacción, y son influenciados principalmente por su uso y manejo (Godfray *et al.*, 2010).

A pesar del amplio conocimiento que se ha generado sobre este recurso, en los últimos años se ha intensificado el proceso de degradación, reduciendo su biodiversidad y capacidad para sostener vida (Oldeman, 2000).

La erosión es la causa más común de la degradación del suelo en el mundo (Perez, 1994; Oldeman, 1994), ya que más del 80% de la superficie terrestre presenta algún grado de afectación por la erosión (Oldeman, 1994).

Myers (1993) reportó que 75 mil millones de toneladas de suelo se erosionan cada año de zonas agrícolas en todo el mundo. Pasquale *et al.* (2017) estimaron una tasa de erosión a nivel mundial de 35.9 billones de toneladas en 2012, y un incremento anual de 2.5% en la tasa de erosión, impulsado principalmente por los cambios espaciales de uso de suelo y prácticas agrícolas insostenibles.

El proceso de erosión se ha acelerado por actividades humanas y malas prácticas agrícolas, como la gestión ineficaz del agua y el riego, la agricultura a gran escala, la deforestación, el sobrepastoreo y las actividades de construcción (Yassoglou *et al.*, 1998). Con una tasa muy lenta de formación de suelo, cualquier pérdida mayor a $1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ puede considerarse irreversible dentro de un período de tiempo de 50 a 100 años (Jones *et al.*, 2004).

La pérdida física del suelo implica la disminución de nutrientes (Christensen, 1989; Boddy *et al.*, 1988) y la afectación significativa de su productividad y calidad de agua

superficial (Holz *et al.*, 2016), constituyendo un serio desafío para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad del ecosistema (Montgomery, 2010).

Hillel (1992) señala que el deterioro de las propiedades del suelo debido a la erosión está relacionado con una menor infiltración y disponibilidad de agua, la pérdida de materia orgánica que reduce la penetración de las raíces, la humedad y la permeabilidad del suelo, la pérdida de nutrientes y una disminución del potencial de producción (Van Der Knijff *et al.*, 2000).

El panorama en México no es diferente en comparación al escenario global, ya que la erosión es el proceso más importante de degradación del suelo y uno de los principales problemas ambientales del país (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2003). Se estima que anualmente se pierden 535 millones de toneladas de suelo por erosión (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca [SEMARNAP], 2000) y que el 76% de la superficie nacional tiene algún grado de afectación por erosión, los estados más afectados son: Ciudad de México, Tlaxcala, Estado de México y Michoacán (Bolaños *et al.*, 2016).

Particularmente para el estado de Tlaxcala, Alvarado (2000) señala que el 93.7% de su territorio presenta erosión en diferentes tipos, formas y grados; y que el 55.9% sufre grados de erosión severa y muy severa, $50-190 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ y $200-650 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, respectivamente (Alvarado *et al.*, 2007); así mismo, Saldaña y Conde (2003) mencionan que Tlaxcala ocupa el séptimo lugar a nivel nacional en problemas de erosión.

Con el propósito de resolver parte de esta problemática, el gobierno federal y estatal ha ejecutado medidas estructurales para el control y restauración de áreas erosionadas, normar el uso del suelo, e incrementar el rendimiento de los cultivos. Las obras que se han establecido con mayor frecuencia en Tlaxcala son: terrazas de formación paulatina, terrazas de banco, la siembra de plantas de maguey o nopal

en bordos, presas filtrantes para el control de azolves, tinas ciegas, tanques de almacenamiento y ollas de agua (Secretaría de Fomento Agropecuario [SEFOA], 2012).

A pesar de la extensa cobertura de programas e inversión, la degradación del suelo y la baja productividad de zonas agrícolas siguen siendo problemas recurrentes en la entidad, este escenario se relaciona con la falta de información referente a las obras de conservación de suelo y agua establecidas en la entidad. La escasez de datos dificulta evaluar el impacto directo de dichas obras frente a procesos de degradación, propiedades fisicoquímicas del suelo y su influencia en el proceso de producción agrícola.

Actualmente en Tlaxcala no existe un inventario de obras de conservación. SEFOA (2014) solo reporta el tipo de obra y la superficie intervenida por municipio. La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA] (2015) reporta únicamente el tipo de obra y volumetría a nivel municipal. En ambos casos, no especifican ubicación geográfica, dimensiones de obra, datos acumulados y/o históricos de obras construidas.

A nivel internacional, Wei *et al.* (2016) realizaron un inventario histórico de obras de conservación de suelo y agua fundamentado en revisión bibliográfica de 437 artículos, sin embargo, el resultado de ese trabajo fue la cuantificación de reportes de obra por país y la tipología de terrazas en subregiones geográficas internacionales, prescindiendo de información relevante como superficie intervenida y dimensiones de obra.

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue generar un inventario de obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala, que contenga información sobre el tipo de obra, ubicación geográfica, superficie intervenida y características morfométricas (longitud, intervalos, superficie intervenida, entre otros). Esta

información será la base para analizar el efecto de las obras de conservación sobre el ambiente y socio economía de las áreas intervenidas.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

El estado de Tlaxcala se localiza dentro del triángulo formado por la Sierra Madre Oriental y el Eje Neovolcánico Transversal, entre los 19°05'43" y 19°44'07" latitud norte y los 97°37'07" y 98°42'51" longitud oeste (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 1986), colinda al norte, este y sur con el estado de Puebla, al noroeste con Hidalgo, y al oeste con el Estado de México (Figura 1.1), el estado se divide en 60 municipios donde habitan 1,169,936 personas (INEGI, 2011).

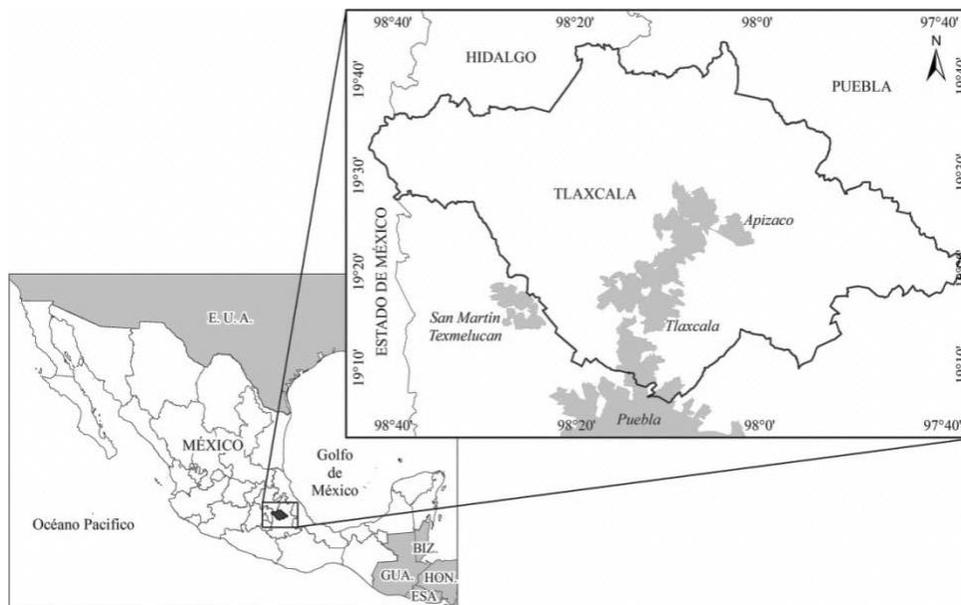


Figura 1.1. Localización del estado de Tlaxcala.

Identificación, delimitación y clasificación de obras

El primer paso consistió en identificar obras de conservación de suelo y agua sobre imágenes satelitales TerraColor, SPOT y Landsat (tomadas entre los años 2016 y 2017), en la identificación se utilizaron los elementos de fotointerpretación propuestos por Terrazas (1991): forma, tamaño, tono, textura y localización.

También se usó un mapa con rangos de pendiente (0-2%, 2-5%, 5-10%, 10-15%, 15-30%, >30%; Figura 1.2) y un mapa de curvas a nivel (Figura 1.3). Los mapas fueron generados como instrumento auxiliar en la identificación de obras, ya que el grado de pendiente y las diferencias altitudinales son referencia de ciertos tipos de éstas (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2000).

Para crear el mapa de pendientes se usó la herramienta *slope* y para el mapa de curvas a nivel se empleó *contour* de ArcGis 10.3, ambos mapas se constituyeron con base en el modelo digital de elevación [MDE] LiDAR [Light Detection and Ranging] de terreno que tiene una resolución de 15 m en la horizontal y 1 m en la vertical (INEGI, 2013).

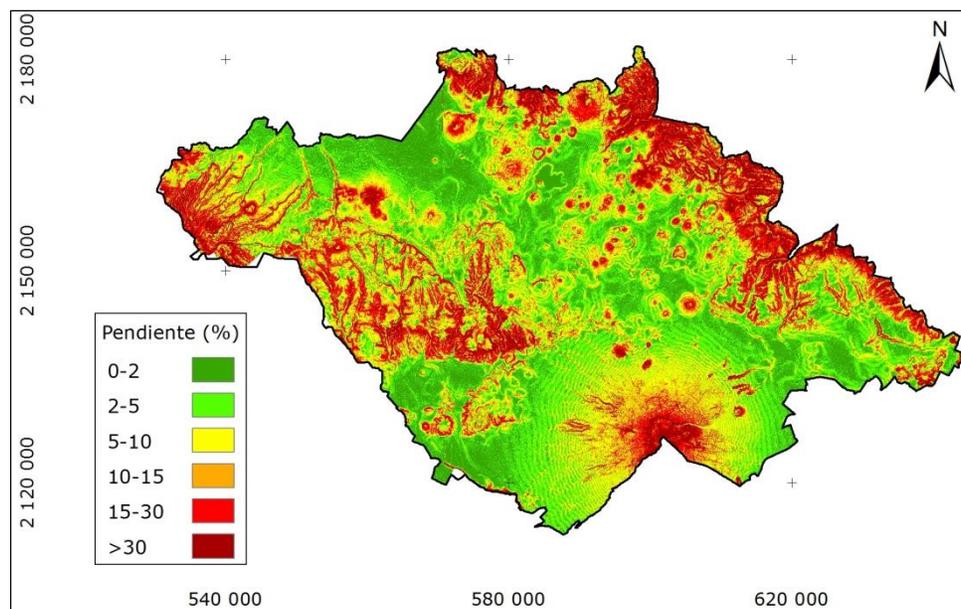


Figura 1.2. Mapa de pendientes del estado de Tlaxcala.

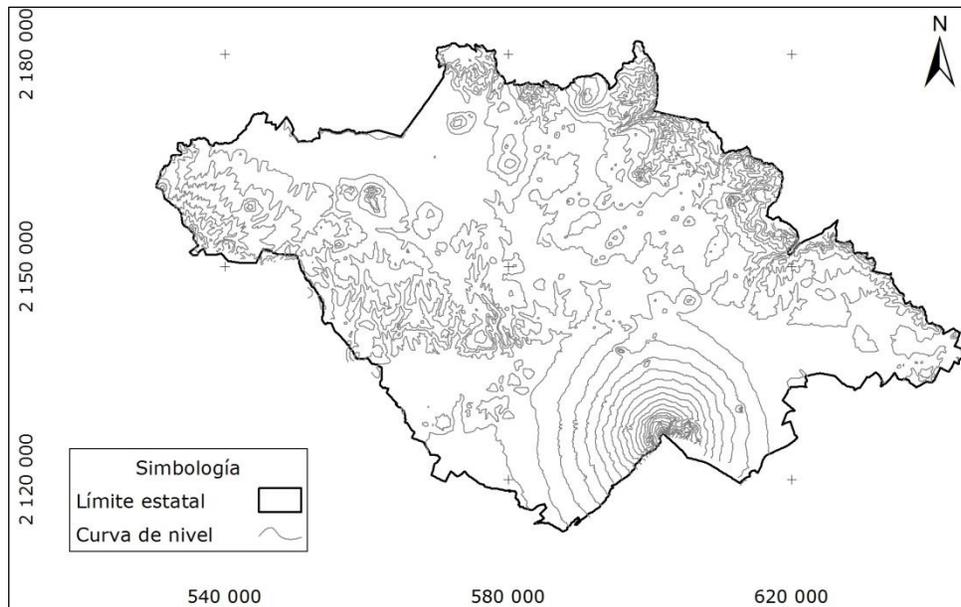


Figura 1.3. Mapa de curvas a nivel del estado de Tlaxcala.

Una vez identificadas las obras, se delimitaron mediante la digitalización –libre y georreferenciada– de polígonos en formato *shapfile*, usando el comando *Create New Shapefile* de ArcGis 10.3.

Posteriormente se clasificaron los polígonos en cuatro tipos de obra que fueron establecidos previamente por los autores:

1. Obras de conservación forestal. Comúnmente conocidas como reforestaciones, ubicadas en terrenos forestales o preferentemente forestales.
2. Obras de conservación agrícola. Obras establecidas estrictamente en terrenos de uso agrícola, esta categoría se dividió en tres tipos:
 - 2.1. Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel. Son parcelas agrícolas que siguen claramente las curvas a nivel. Estas obras implican un movimiento de suelo, e incluye las terrazas de formación sucesiva y de banco.
 - 2.2. Parcela perpendicular a la pendiente. Parcelas agrícolas que no siguen estrictamente las curvas a nivel, pero su contorno es una línea perpendicular a la pendiente, adoptando el término de bordería interparcelaria.

2.3. Área urbana con parcelamientos. Se caracterizan por la invasión de asentamientos humanos sobre áreas agrícolas con algún tipo de obra de conservación.

Integración de la Base de Datos

La digitalización en ArcGis 10.3 generó un archivo con referencia espacial que permite ubicar geográficamente los polígonos con obra, por lo que el siguiente paso fue integrar la Base de Datos, definida por Duran (2012) como un instrumento de consulta, que contiene características de todos sus componentes y permite su rápida localización.

La Base está integrada por cuatro atributos principales, todos y cada uno de los polígonos del inventario los poseen: (A) identificador único [ID]; (B) clasificación del tipo de obra; (C) área del polígono en kilómetros cuadrados; (D) perímetro en kilómetros.

Adicionalmente se integraron 13 atributos más que corresponden a una Caracterización en gabinete y a un proceso de Análisis de consistencia de información, sin embargo, solo los polígonos seleccionados cuentan con dichos atributos.

Caracterización en gabinete

Uno de los objetivos particulares de la investigación es la caracterización de las obras, no obstante, el alto número de polígonos digitalizados obligó a establecer un sistema de muestreo que permita obtener información (eficiente y confiable) de una muestra representativa de la población de estudio. El método utilizado fue el muestreo de Proporciones con Varianza Máxima (Ecuación 1.1) que permitió una confianza de 90% y un margen de error de 10%, (Fernández, 1996; Badii, Castillo y Guillen, 2008; Cantoni, 2009).

$$n = \frac{NZ_{\alpha/2}^2 pq}{e^2(N-1) + Z_{\alpha/2}^2 pq} \quad (1.1)$$

Donde n = tamaño de la muestra; N = tamaño de la población de estudio; $Z_{\alpha/2}^2$ = Nivel de confianza, en este caso equivale a 1.645 al pretender $\geq 90\%$; p = proporción esperada (0.50); $q = 1 - p$; e = precisión, en este caso equivale a 0.10 si el error es $\leq 10\%$.

Resolviendo la Ecuación 1 se obtuvo un valor de 66 polígonos con obra, los cuales constituyen la muestra caracterizada en gabinete. La selección de estos polígonos se hizo aleatoriamente, para ello el primer paso fue calcular el centroide de cada uno de los polígonos mediante el comando *Feature To point* (en ArcGis 10.3); posteriormente se asignó un ID a cada centroide; finalmente, para evitar preferencias de muestreo y garantizar que los 2,469 polígonos (que integran el inventario) tengan la misma posibilidad de ser muestreados, se utilizó la función *ALEATORIO.ENTRE* (de Microsoft Excel 365), estableciendo un intervalo cerrado desde 1 hasta 2,469, este último paso se repitió 66 veces.

De los 66 polígonos: 11 corresponden a Conservación forestal, 39 a Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel, y 16 a Parcela perpendicular a la pendiente. El tipo de obra Área urbana con parcelamientos fue excluida para los procesos de Caracterización en gabinete y Análisis de consistencia de información, ya que no representan íntegramente zonas con obra debido a la intervención antrópica, situación que dificulta la medición de parámetros morfológicos.

Los atributos evaluados en este proceso fueron: (E) longitud de la terraza, (F) espaciamiento entre terrazas o intervalo horizontal, (G) longitud del bordo, y (H) espaciamiento entre bordos o distancia superficial, todos ellos estimados con el comando *Calculate Geometry* de ArcGis 10.3.

Análisis de consistencia de información

Esta actividad consistió en localizar 20 sitios en campo (o puntos de entrenamiento) que fueron elegidos aleatoriamente de la muestra de 66 polígonos, su propósito fue verificar la categorización hecha en gabinete y complementar la Base de Datos. El número de sitios obedeció al presupuesto asignado al proyecto.

La selección también se hizo en Microsoft Excel 365 empleado la función *ALEATORIO.ENTRE*. De los 20 sitios: cinco correspondientes a Conservación forestal; siete a Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel; y ocho a Parcela perpendicular a la pendiente. Los atributos medidos en campo para obras de Conservación forestal fueron: (I) pendiente del terreno, (J) especie vegetal, (K) arreglo topológico, (L) distancia entre plantas, (M) distancia entre hileras, (N) densidad de plantación, y (O) porcentaje de sobrevivencia. Para Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel se midió: (I) pendiente del terreno, (P) altura de bancales, (Q) ancho de bancales, (R) relación de talud, (S) ancho de borde, y (T) altura de borde. En Parcela perpendicular a la pendiente se midieron los atributos de: (I) pendiente del terreno, (S) ancho de borde, (T) altura de borde, y (U) ancho de corona.

Los puntos de entrenamiento quedaron establecidos sobre una ruta-transecto que recorre de Este a Oeste el estado de Tlaxcala (Figura 1.4), cada sitio fue localizado en campo mediante el uso de un dispositivo GPS (con precisión de +/-3m).

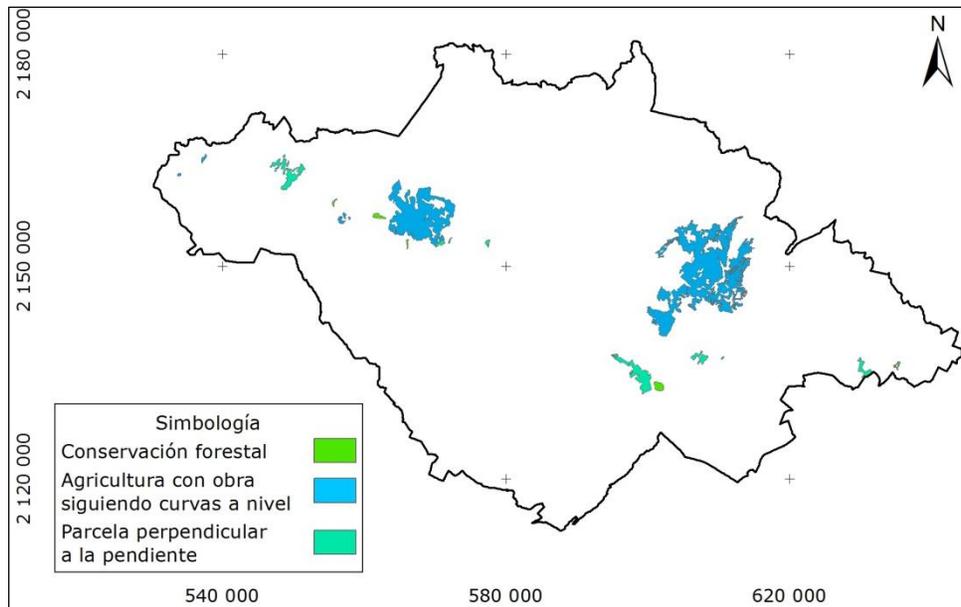


Figura 1.4. Distribución de los polígonos con obra de conservación elegidos para el proceso de Análisis de consistencia de información.

1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Base de Datos del inventario

La identificación y delimitación de polígonos definió cuatro tipos de obra de conservación de suelo y agua (Cuadro 1.1 y Figura 1.5).

Cuadro 1.1. Tipos y número de polígonos del Inventario de obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala.

Tipo de obra	Número de polígonos	Superficie (km ²)	Porcentaje	Relación con la superficie estatal (%)
Conservación forestal	1,291	1,127	58	6
Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel	498	416	22	28
Parcela perpendicular a la pendiente	585	226	12	10
Área urbana con parcelamientos	95	164	8	4
Total	2,469	1,933	100	48

Fuente: elaboración propia.

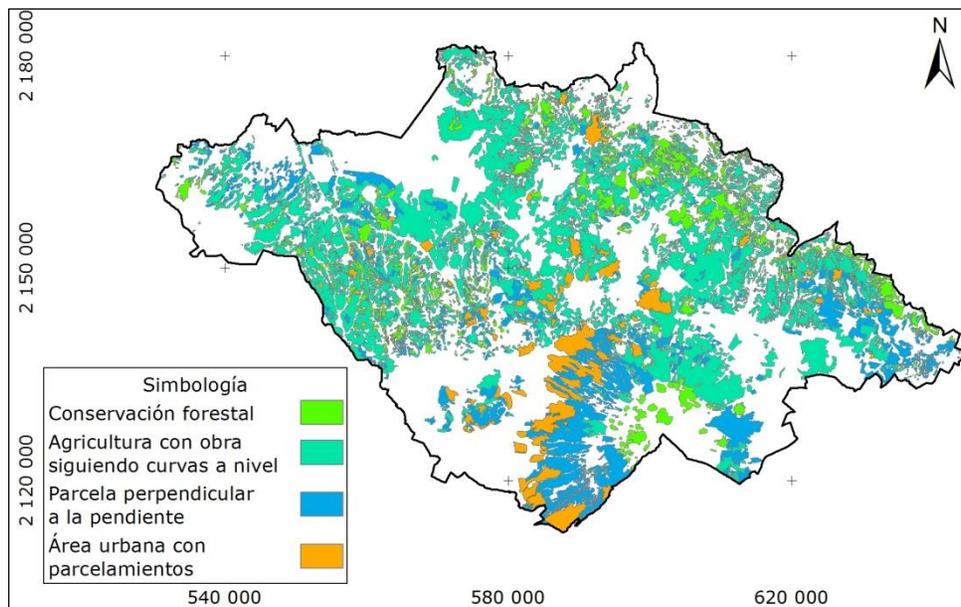


Figura 1.5. Mapa del Inventario de obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala.

En la Cuadro 1.2 se muestra un bosquejo de la Base de Datos del inventario, la cual contiene los parámetros de los tres niveles de caracterización (general, gabinete y campo).

Cuadro 1.2. Base de Datos del Inventario de obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala.

ID	Tipo de obra	Área	Perímetro	Longitud de terraza	Intervalo horizontal	Longitud del bordo	Distancia superficial	Pendiente	Especie	Arreglo topológico	Distancia entre plantas	Distancia entre hileras	Densidad de plantación	Porcentaje de sobrevivencia	Altura del bancal	Ancho del bancal	Relación de talud	Ancho de bordo	Altura del bordo	Ancho de corona
Primer nivel de caracterización																				
999	Conservación forestal	2.5	7.4																	
Segundo nivel de caracterización (muestra de 66 sitios)																				
932	Parcela perpendicular a la pendiente	22.9	19.7			1 370.3	17.7													
243	Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel	12.3	14.8	886.2	19.9															

Tercer nivel de caracterización (submuestra de 20 sitios)		
932	243	999
Parcela perpendicular a la pendiente	Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel	Conservación forestal
22.9	12.3	2.5
19.7	14.8	7.4
	886.2	
	19.9	
1 370.3		
17.7		
7.1	4.8	14.3
		<i>Pinus</i>
		Tresbolillo
		3.5
		4.0
		715.0
		41.8
	1.1	
	20.4	
	1:2	
2.7	1.1	
0.8	0.2	
0.5		

Fuente: elaboración propia.

Caracterización de obras en gabinete

Los estadísticos descritos a continuación son el resultado de mediciones morfológicas realizadas a la muestra de 66 polígonos.

Los sitios con obra clasificados como Conservación forestal se ubican en zonas de buena cobertura vegetal (Figura 1.6), característica que dificultó su identificación, sin embargo, el arreglo topológico de las prácticas de reforestación fue un elemento práctico en la delimitación. El área promedio de los sitios reforestados es 5.4 hectáreas, sus longitudes (de polígonos) varía de 77 a 511 m y anchos de 70 a 485 m.



Figura 1.6. Ejemplo de polígono de Conservación forestal.

Los sitios con obra clasificados como Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel mantienen claramente su contorno siguiendo la dirección de las curvas, ensanchando su intervalo horizontal en zonas llanas y acortándolo en zonas de mayor pendiente o de importante diferencia altitudinal (Figura 1.7), en algunos polígonos desaparecen parcialmente las líneas, lo cual podría deberse al bajo o nulo mantenimiento de las obras y al abandono de los terrenos de cultivo. Para este tipo de obras se estimó un área promedio de 7.2 hectáreas, longitudes de terrazas en un rango de 74 m a 919 m, y espaciamiento entre terrazas en un rango de 9.8 m a 54 m.



Figura 1.7. Ejemplo de polígono de Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel.

Los sitios con obra clasificados como Parcela perpendicular a la pendiente se identifican por la presencia de líneas divisorias que corren en dirección perpendicular a la pendiente, además de presentar especies vegetales sobre bordos que funcionan como barreras vivas (Figura 1.8). El área promedio de los polígonos es de 11.7 hectáreas, longitudes de bordo que varían de 69 m a 1,573 m, y espaciamiento entre bordos de 17.7 m a 59.9 m.



Figura 1.8. Ejemplo de polígono de Parcela perpendicular a la pendiente.

Análisis de consistencia de información

Esta actividad permitió verificar los datos obtenidos en la Caracterización de gabinete, principalmente la clasificación del tipo de obra, también completó la descripción morfológica de 20 polígonos (de la muestra de 66). Los estadísticos descritos a continuación son el resultado de mediciones hechas en campo.

Los polígonos con obras de Conservación forestal presentan una pendiente media de 24%, en todas se observó el uso de especies arbóreas del genero *Pinus* en arreglos topológicos a tresbolillo y marco real, la distancia promedio entre plantas y distancia promedio entre hileras es de 2.9 m y 3.1 m, respectivamente, así como una densidad de plantación promedio de 1,486 plantas/hectárea, el porcentaje de sobrevivencia oscila entre un 10% y 70%. Las prácticas de reforestación van acompañadas de obras complementarias como zanjas bordo, zanja trinchera o roturación (Figura 1.9).



Figura 1.9. Evidencia fotográfica de obras de Conservación forestal.

Los sitios de Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel presentan una pendiente media de 13%. En esta categoría de obra están incluidas las terrazas de banco y terrazas de formación sucesiva. Las primeras tienen una altura promedio de bancale de 1.2 m y un ancho promedio de bancale de 20.4 m, los taludes de los bancales varían de 1:1.3 a 1:2, y presentan especies vegetales a la orilla de los bancales que funcionan como barreras vivas (Figura 1.10a). Por otro lado, las terrazas de formación sucesiva están conformadas por esquemas de zanja-bordo, los cuales tienen en promedio un ancho de 2.1 m y una altura de 0.4 m (Figura 1.10b).



Figura 1.10a. Evidencia fotográfica de terraza de banco.



Figura 1.10b. Evidencia fotográfica de terraza de formación sucesiva.

Los sitios clasificados como Parcela perpendicular a la pendiente tienen una pendiente media de 13%, presentan un bordo en la parte baja cuyas medidas

promedio son: altura de 0.8 m, ancho de 2.4 m, y ancho de corona de 0.7 m. Se observó que estos bordos no asumen dimensiones uniformes en su diseño debido a que son empleados principalmente como límites de parcela y no como obra de conservación del suelo (a pesar de su clara intervención en el proceso erosivo), también se observaron especies vegetales sobre los bordos (Figura 1.11).



Figura 1.11. Evidencia fotográfica de Parcela perpendicular a la pendiente.

El Inventario de obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala, se integró a un sistema informático que puede ser consultado en la plataforma de Google Earth Pro (Figura 1.12).

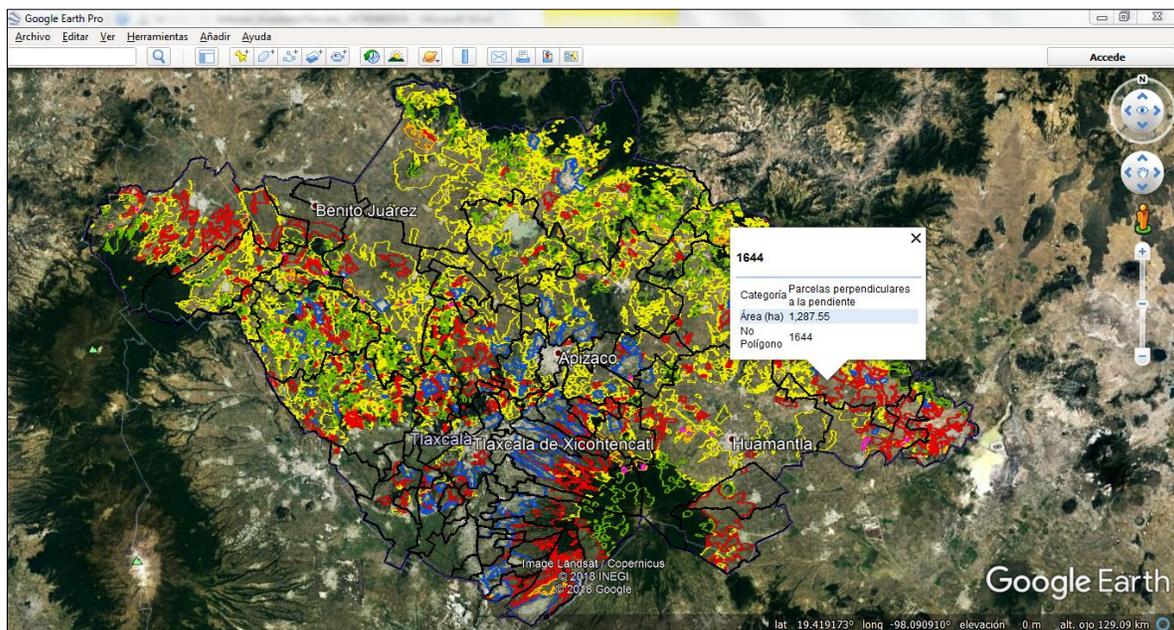


Figura 1.12. Inventario de obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala visualizado en la Plataforma de Google Earth Pro.

1.6 CONCLUSIONES

El análisis de imágenes satelitales y uso de SIG permitió clasificar cuatro tipos de obra: Conservación forestal, Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel, Parcela perpendicular a la pendiente y Área urbana con parcelamientos, que ocupan un áreas de 226 km²; 1,127 km²; 416 km²; y 164 km², respectivamente.

La longitud y ancho promedio de polígonos de Conservación forestal es de 214.6 m y 243.3 m, respectivamente; en polígonos de Agricultura con obra la longitud promedio del espaciamiento entre curvas de nivel es de 282.2 m, y entre terrazas es de 25.7 m; en Parcela perpendicular a la pendiente se estimó una longitud promedio de 369.6 m y un espaciamiento entre bordos de 32.4 m. Estos datos son representativos y extrapolables al total de polígonos que conforman el Inventario de obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala, ya que la muestra evaluada se estableció con un sistema estadístico-descriptivo denominado muestreo de Proporciones con Varianza Máxima, con 90% de confianza y 10% de error.

1.7 REFERENCIAS

- Alvarado, C.M. (2000). Diagnóstico de la erosión hídrica en el estado de Tlaxcala. Michoacán, México: Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales A.C.
- Alvarado, C.M., Colmenero, R. J. A., & Valderrábano, A. M. (2007). La erosión del suelo en un contexto ambiental, en el estado de Tlaxcala, México. *Ciencia Ergo Sum*, 14(3), 317-326.
- Badii, M.J., Castillo, J., & Guillen, A. (2008). Tamaño óptimo de la muestra. *Innovaciones de Negocios*, 5(1), 53-65.
- Blum, W.H. (2005). Functions of soil for society and the environment. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 4(3), 75–79.

- Boddy, L., Watling, R., & Lyon, A.J.E. (eds.). (1987). *Fungi and ecological disturbance*. Edinburgh, Scotland: University of Sheffield.
- Bolaños, G.M.A., Paz, P.F., Cruz, G.C.O., Argumedo, E.J.A., Romero, B.V.M., & Cruz de la, C.J.C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 271-288.
- Cantoni, R.N.M. (2009). Técnicas de muestreo y determinación del tamaño de la muestra en investigación cuantitativa. *Revista Argentina de Humanidades y Ciencias Sociales*, 7(2).
- CEC. (2006). *Thematic Strategy for Soil Protection*. Commission of the European Communities, Brussels.
- Christensen, M. (1989). A view of fungal ecology. *Mycologia*, 81(1), 1–19. DOI: 10.2307/3759446.
- Duran, Y. (2012). Administración del inventario: elemento clave para la optimización de las utilidades en las empresas. *Visión Gerencial*, (1), 55-78.
- FAO. (2000). *Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Fernández, S.P. (1996). Determinación del tamaño muestral. *Cad Aten Primaria*, 3, 138-141.
- Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., & Toulmin, C. (2010). Food security: the challenge of feeding billion people. *Science*, 327(5967), 812–818. DOI: 10.1126/science.1185383.
- Hannam, I., & Boer, B. (2004). *Drafting Legislation for Sustainable Soils: A Guide* (1st ed.). Norwich, United Kingdom: IWMI.
- Hillel, D. (1992). *Out of the Earth: Civilization and the Life of the Soil* (1st ed.). New York, United States of America: University of California Press.
- Holz, D.J., Williard, K. W. J., Edwards, P. J., & Schoonover, J. E. (2015). Soil erosion in humid regions: a review. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 154, 48-59.
- INEGI. (1986). *Síntesis Geográfica del Estado de Tlaxcala*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2011). *Censo de Población y Vivienda 2010*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

- Jones, R.J.A., Hiederer, R., Rusco, E., Loveland, P.J., & Montanarella, L. (2004). The map of organic carbon in topsoils in Europe, Version 1.2. Luxembourg: European Soil Bureau.
- Montgomery, H.L. (2010). How Is Soil Made?. New York, United States of America: Crabtree Publishing Company.
- Myers, N. (1993). Gaia: An atlas of planet management. Universidad de Michigan: Anchor Books.
- Oldeman, L.R. (1994). The Global Extent of Soil Degradation. In: Greenland, D.J. & Szabolcs, I. (eds.). Soil Resilience and Sustainable Landuse, (pp. 99-119). University of Reading, UK: CAB International.
- Oldeman, L.R. (2000). Impact of Soil Degradation: A Global Scenario. Wageningen, Netherlands: International Soil Reference and Information Center.
- Pasquale, B., Robinson, A.D., Fleischer, R.L., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Van O.K., Montanarella, L., & Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. NATURE PUBLISHING GROUP. DOI: 10.1038/s41467-017-02142-7.
- Perez, T.F. (1994). Desertification and land degradation in the European Mediterranean. Luxembourg: European Commission.
- SAGARPA. (2015). Compendio de Indicadores 2014. Componente Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua [COUSSA] TLAXCALA. México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Saldaña, M., & Conde, J. (3 de abril de 2003). Ocupa Tlaxcala el primer lugar nacional en deterioro ambiental. El Sol de Tlaxcala.
- SEFOA. (2012). Informe Anual de Tlaxcala (2011-2016). Tlaxcala, México: Secretaría de Fomento Agropecuario.
- SEFOA. (2014). Evaluación de Consistencia y Resultados. Programa estratégico de Seguridad Alimentaria [PESA]. Tlaxcala, México: Secretaría de Fomento Agropecuario.
- SEMARNAP. (2000). Indicadores para la evaluación del desempeño ambiental: Reporte 2000. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP, México: Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.
- SEMARNAT. (2003). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales 2002. SEMARNAT, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Terrazas, D.S. (1991). Interpretación automática de tipos de erosión a partir de la digitalización de ortofotografías (tesis de maestría). Colegio de Posgraduados, Montecillos, Texcoco, Edo. de México.

- Van Der Knijff, J.M., Jones, R.J.A., & Montanarella, L. (2000). *Soil Erosion Risk Assessment in Europe* (1st ed.). Luxembourg: European Soil Bureau.
- Wei, W. Chen, D., Wang, L., Daryanto, S., Chen, L., Yu, Y., Lu, Y., Sun, G., & Feng, T. (2016). Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing. *Earth-Science Reviews*, 159, 388-403.
- Yassoglou, N., Montanarella, L., Govers, G., Van Lynden, G., Jones, R.J.A., Zdruli, P., Kirkby, M., Giordano, A., Le Bissonnais, Y., Daroussin, J., & King, D. (1998). *Soil Erosion in Europe* (1st ed.). Luxembourg: European Soil Bureau.
- Young, I., & Crawford, J. (2004). Interactions and self-organisation in the soil-microbe complex. *Science*, 304, 1634–1637.

CAPÍTULO II. USO DE SIG Y DISEÑO MUESTRAL ESTRATIFICADO PARA EVALUAR OBRAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA

2.1 RESUMEN

En México se han realizado diversos tipos de obras de conservación de suelo y agua a través de múltiples programas gubernamentales, algunos se han evaluado con dos sistemas de muestreo: Simple Aleatorio [SA] y Proporciones con Varianza Máxima [PVM], los cuales tienen la desventaja de requerir un número alto de muestras. El objetivo de esta investigación fue diseñar, con el apoyo de sistemas de información geográfica [SIG], un Muestreo Estratificado [ME] para evaluar obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala, que permita obtener información confiable a partir de una pequeña muestra. La población de estudio se constituyó de 308 polígonos con presencia de estas obras [CO] distribuidas en dos regiones de la entidad, a la cual se aplicaron tres sistemas de muestreo (con 92% de confianza): ME, SA y PVM. El ME generó un tamaño de muestra de 16 polígonos CO, cifra menor a la obtenida con los sistemas SA y PVM: 129 y 191, respectivamente. El uso del ME para establecer el número de muestras implica menor tiempo y costo en las actividades de evaluación de obras de conservación de suelo y agua en comparación al SA y PVM.

Palabras clave: sistemas de información geográfica, obras de conservación de suelo y agua, sistema de muestreo estratificado.

USE OF GIS IN THE SAMPLE DESIGN TO EVALUATE SOIL AND WATER CONSERVATION WORKS

2.2 ABSTRACT

In Mexico various types of soil and water conservation works have been carried out through multiple government programs, some have been evaluated with two sampling systems: Simple Random [SA] and Proportions with Maximum Variance [PVM], which have the disadvantage of requiring a high number of samples. The objective of this research was to design by using geographic information systems [GIS], a Stratified Sampling [ME] to evaluate soil and water conservation works in Tlaxcala, which allows obtaining reliable information from a small sample. The study population was made up of 308 polygons with the presence of these works [CO] distributed in two regions of the state, to which three sampling systems were applied (with 92% confidence): ME, SA and PVM. The ME generated a sample size of 16 CO polygons, a lower figure than that obtained with the SA and PVM systems: 129 and 191, respectively. Using the ME to establish the sample number implies less time and cost of activities in soil and water evaluation works compared to SA and PVM.

Keywords: geographic information systems, soil and water conservation works, stratified sampling system.

2.3 INTRODUCCIÓN

En México, la Comisión Nacional Forestal [CONAFOR] ha realizado diversos trabajos de conservación y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales mediante los programas: Proyecto de Conservación y Manejo Sustentable de Recursos Forestales [PROCYMAF]; ProÁrbol; Programa Nacional de Reforestación [PRONARE]; Programa de Conservación y Restauración de Ecosistemas Forestales [PROCOREF]; Programa Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos [PSAH]; Programa para Desarrollar el Mercado de Servicios Ambientales por Captura de Carbono, derivados de la Biodiversidad y Establecimiento y Mejoramiento de Sistemas Agroforestales [PSA-CABSA]; Programa Nacional Forestal de Cuencas Hidrográficas Prioritarias [PRONAFOR-CHP]; Programa de Acciones de Prevención y Control de la Sequía en Terrenos Forestales [PAPCSTF]; entre otros; varios de éstos han sido evaluados, por ejemplo, en 2005 se evaluó el PSA-CABSA aplicando un sistema de muestreo basado en estadística inferencial (CONAFOR, 2005) propuesto por Freese (1969) y Rossi *et al.* (1985), quienes sugieren que la muestra equivalente al 33% de la población total es estadísticamente suficiente y asegura características extrapolables. En ese mismo año se evaluó el PRONARE para los ejercicios fiscales 2003 a 2007 (CONAFOR, 2008a) y 2005 a 2009 (CONAFOR, 2010), en ambos casos la unidad muestral se obtuvo con un sistema estadístico-descriptivo denominado muestreo Simple Aleatorio (Ecuación 2.1):

$$n = \frac{N\sigma^2}{(N-1)D + \sigma^2} \quad (2.1)$$

Donde: n = tamaño de la muestra; N = tamaño de la población de estudio; σ^2 = varianza de la población de estudio; D = precisión o margen de error.

En el año 2008 se evaluó el Subprograma de Conservación y Restauración de Suelos del PAPCSTF en sus ejercicios fiscales 2004 a 2006 (CONAFOR, 2008b),

determinando la muestra por el sistema de Proporciones con Varianza Máxima (Fernández, 1996; Badii, Castillo y Guillen, 2008; Cantoni, 2009), Ecuación 2.2.

$$n = \frac{NZ^2pq}{E^2(N - 1) + Z^2pq} \quad (2.2)$$

Donde: n = tamaño de la muestra; N = tamaño de la población de estudio; Z^2 = nivel de confianza; E^2 = precisión o margen de error; p = proporción esperada; $q = 1-p$.

Entre los programas agrícolas dirigidos por la Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], que implementa acciones de conservación de suelo y agua destacan: Apoyos Directos al Campo en su modalidad Pro-Campo Ecológico; Programa Manejo Integral del Suelo y Agua de la Alianza para el Campo [APC]; Programa Estratégico de Seguridad Alimentaria [PESA]; Programa Integral de Desarrollo Rural en su Componente Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua [COUSSA]; Programa de Productividad Rural en su Componente Infraestructura Productiva para el Aprovechamiento Sustentable de Suelo y Agua [IPASSA]; Programa Integral de Atención a Zonas con Sequía Recurrente [PIASRE]; Programa Nacional de Microcuencas de FIRCO y CONAZA; entre otros. La mayoría de éstos construye anualmente un número reducido de obras (<10), que son evaluadas con base en censos y no en muestreos; por ejemplo, el Componente COUSSA 2014 (SAGARPA, 2015) y 2015 (SAGARPA, 2016) evaluaron 12 obras en Tlaxcala (seis por programa); así mismo, el Componente IPASSA en 2016 (SAGARPA, 2017a) y en 2017 (SAGARPA, 2017b) evaluaron cuatro obras (dos por programa).

En otras investigaciones, cuyo propósito fue evaluar obras de conservación de suelo y agua (Sánchez *et al.*, 2008; Sánchez, 2012; Villa, 2014; Cocoltzi y Ramírez, 2017), aplicaron la Ecuación 2.2 para obtener la unidad muestral. También se han utilizado parámetros cualitativos: Nava (2005) seleccionó las muestras con base en

características sociales y biofísicas; Cotler *et al.* (2013a, 2013b, 2013c y 2015) eligieron obras de conservación según su tipología y ubicación (Loch, 2004); Cram *et al.* (2008) emplearon cuatro criterios de selección: el tipo de práctica más común o de mayor frecuencia, sitios con una superficie mínima, sitios que presentarán más de una obra de conservación y la accesibilidad a los sitios de muestreo.

En el ámbito internacional existen evaluaciones de obras donde la unidad muestral se estableció con base en el tamaño de la población de estudio, el área de trabajo, los recursos económicos disponibles, y los objetivos de cada investigación. A continuación, se mencionarán algunos ejemplos.

Hailu *et al.* (2012) evaluaron el efecto sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo que tiene una obra de conservación llamada localmente Fanya juu en la cuenca Goromti, Etiopía. Compararon zonas con presencia de esta obra vs zonas sin obra; tomaron 27 muestras de suelo (20 cm) aleatoriamente en ambas zonas, el número de muestras correspondió al área de trabajo.

Dano y Midmore (2004) encuestaron a agricultores de la cuenca Manupali, Filipinas, con el objetivo de conocer las percepciones y actitudes sobre las técnicas de producción agrícola y algunas obras de conservación. Teshome *et al.* (2013) realizaron un trabajo similar, estimaron la eficiencia económica de obras de conservación mediante la encuesta de 60 agricultores seleccionados al azar en dos cuencas de Etiopía: Debre Mewi y Anjeni. En ambos trabajos entrevistaron al mayor número de productores en función de los recursos económicos disponibles.

Zhang *et al.* (2014) evaluaron en Gansu, China, el efecto de dos tipos de obra de conservación sobre: el contenido de agua en el suelo, agua total consumida y crecimiento de plantas reforestadas. Para ello tomaron dos conjuntos de datos provenientes de zonas con obra y sin obra, el número de sitios de muestreo correspondió al área de estudio.

Moradi *et al.* (2015), en una plantación de palma de aceite en Selangor, Malasia, evaluaron el efecto de cuatro tipos de obras sobre las propiedades físicas y contenido de agua del suelo, considerando como zona de control una plantación de palma sin obra. Al igual que el ejemplo anterior, el número de sitios de muestreo obedeció al área de estudio.

De los trabajos referidos anteriormente se observa que, cuando la población de obras de conservación es de número reducido, se considera al total de éstas en la evaluación; pero, cuando el universo es grande, se usan sistemas de muestreo que en algunos casos establecen grandes muestras, lo que se traduce en tiempo y costos elevados de trabajo. Para reducir la inversión, los evaluadores recurren a métodos estadísticos inferenciales o determinan el tamaño de la muestra aplicando criterios de selección cualitativos, lo que incrementa la probabilidad de error, ya que los resultados dependen de las características únicas de la muestra.

El objetivo de esta investigación fue diseñar, con el apoyo de sistemas de información geografía [SIG], un Muestreo Estratificado para evaluar obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala, que permita obtener información confiable a partir de un número de muestra menor respecto al que se obtiene con los sistemas comúnmente utilizados en México, como el muestreo Simple Aleatorio y el de Proporciones con Varianza Máxima, los cuales tienen la desventaja de requerir un número alto de muestras e incrementar el tiempo y costo del trabajo de evaluación.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Inventario de obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala

Cocoletzi y Ramírez (2017) realizaron un inventario de obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala, el resultado fue la delimitación y clasificación de cuatro tipos de obra (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Tipos y número de polígonos con obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala.

Tipo de obra	Número de polígonos	Superficie (km ²)	Porcentaje
Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel	1,291	1,127	58
Parcela perpendicular a la pendiente	498	416	22
Conservación forestal	585	226	12
Área urbana con parcelamientos	95	164	8
Total	2,469	1,933	100

Fuente: elaboración propia, con información de Cocolletzi y Ramírez (2017)

Para el presente estudio sólo se consideraron dos tipos de obra: Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel y Parcela perpendicular a la pendiente; para dos Regiones geográficas del estado de Tlaxcala, como se indica adelante.

Fundamento estadístico del sistema de Muestreo Estratificado

La tasa de erosión, el volumen de escurrimiento superficial y la capacidad de infiltración son procesos influenciados por la pendiente del terreno; esta relación también se observa en el inventario de obras de conservación, ya que el tipo y número de obra obedece a la forma del relieve (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2000), concretamente a geoformas cuya pendiente dominante es el criterio principal de diferenciación.

Siendo que las geoformas representan estratos claramente identificables, se propuso emplear el sistema de Muestreo Estratificado (Ecuación 2.3), en el cual primero se identifican dichos estratos para posteriormente realizar un muestreo simple aleatorio de polígonos con obra (previamente sorteados) dentro de cada estrato (Jiménez, 2001; Bai *et al.*, 2013):

$$n = \frac{\sum_{i=1}^L N_i^2 s_i^2}{N^2 V + \sum N_i s_i^2} \quad (2.3)$$

Donde: n = tamaño de la muestra; L = número de estratos; N_i = número de elementos del estrato i ; s_i^2 = varianza del estrato i ; N = tamaño de la población de estudio; V = precisión o margen de error.

La aplicación de este sistema requiere de un Marco de Muestreo que debe calcularse previamente con información referente a las variables de estratificación, los estadísticos a estimar son:

- Varianza de cada estrato (Ecuación 2.4)
- Media de cada estrato (Ecuación 2.5)
- Precisión o margen de error (Ecuación 2.6)

$$s_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n_i - 1} \quad (2.4)$$

Donde s_i^2 = varianza del estrato i ; x_i = valor de cada una de las n observaciones del estrato i ; \bar{x} = media aritmética de las observaciones del estrato i ; n_i = número de observaciones del estrato i .

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n_i} \quad (2.5)$$

Donde: \bar{x} = media aritmética de las observaciones del estrato i ; x_i = valor de cada una de las n observaciones del estrato i ; n_i = número de observaciones del estrato i .

$$V = \left(\frac{d}{Z}\right)^2 \quad (2.6)$$

V = precisión o margen de error; d = error máximo; Z = nivel de confianza.

Uso de SIG en el diseño muestral

El diseño del sistema de Muestreo Estratificado se apoyó en la integración y gestión de un SIG, como se indica a continuación.

A. Mapa base

Se generó un Mapa base que aportó detalles de la zona de estudio y permitió su contextualización territorial. El mapa se integró dentro del entorno operativo de ArcGis 10.3 usando diversas capas de información geográficamente referenciadas en formato ráster y vectorial (Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2. Capas de información geográfica del Mapa Base.

Capa	Formato	Descripción	Fuente
MDE	Ráster	Modelo digital de elevación [MDE] LiDAR [Light Detection and Ranging] de terreno. Resolución de 15 m en la horizontal y 1 m en la vertical.	Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2013a)
Límite estatal	Vectorial	Conjunto de datos vectoriales de información topográfica digital, por condensado estatal. Serie IV 29.-Tlaxcala. Escala 1:250,000.	INEGI (2015)
Obras de conservación		Polígonos de obras de conservación de suelo y agua del Estado Tlaxcala.	Cocoltetzi y Ramírez (2017)
Perfiles de suelos		Conjunto de datos de Perfiles de suelos. Continuo Nacional Serie II. Escala 1:250,000.	INEGI (2013b)
Sistema de topografías		Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional Serie I. Sistema Topoformas. Escala 1:1,000,000.	INEGI (2001)

Fuente: elaboración propia.

B. Mapa de pendientes

La pendiente dominante en la morfología de un paisaje es el criterio principal de diferenciación entre geoformas (FAO, 2009), por ello se generó el Mapa de pendientes del estado de Tlaxcala que incluye gradientes de 0 hasta 100% (Figura 2.1), mediante el MDE LiDAR (INEGI, 2013a) y la herramienta *slope* de ArcGis 10.3.

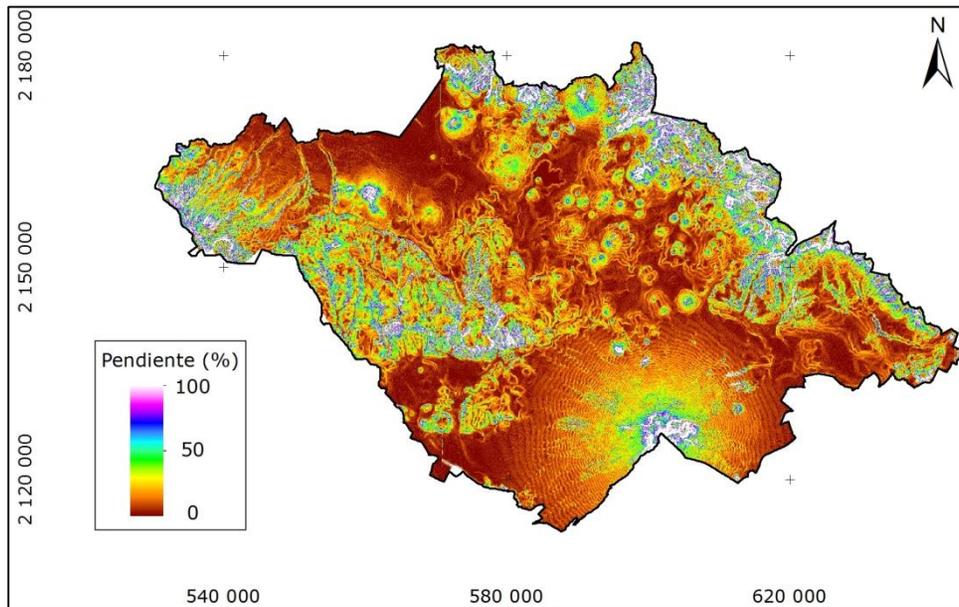


Figura 2.1. Mapa de pendientes del estado de Tlaxcala.

Con el propósito de identificar la pendiente dominante y catalogar las geoformas con base en Batjes (2005), el mapa se reclasificó en cuatro rangos de pendiente: 0-5%, 5-10%, 10-30% y >30% (Figura 2.2), con la herramienta *reclassify* de ArcGis 10.3.

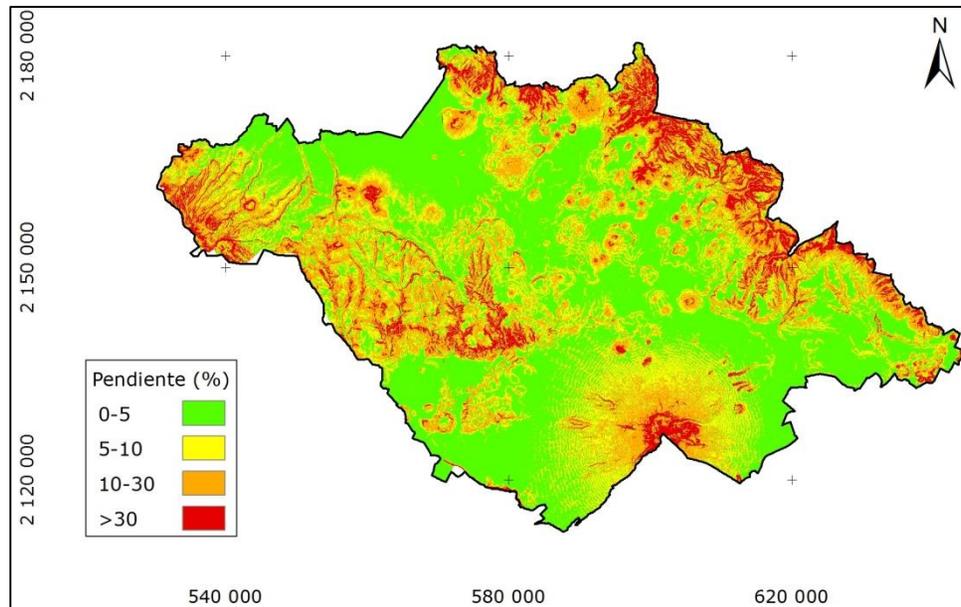


Figura 2.2. Mapa reclasificado de pendientes del estado de Tlaxcala.

Entre las ocho regiones que existen en Tlaxcala (INAFED, 2010), las estudiadas fueron: Altiplano de Tlaxcala [AT] y Volcán La Malinche [VM] (Figura 2.3), debido a que concentran el 50% de la superficie de las obras del inventario (Cocoletzi y Ramírez, 2017). La delimitación se hizo utilizando simultáneamente el Mapa de pendientes, el vectorial de Sistemas de Topoformas y la función de sombreado *Hillshade* de ArcGis 10.3.

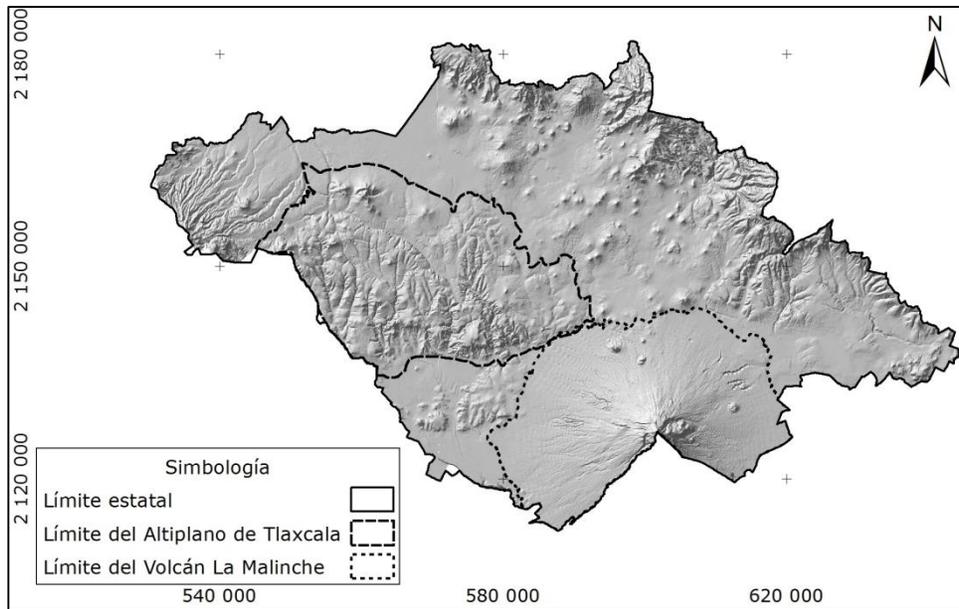


Figura 2.3. Polígonos de las Regiones geográficas Altiplano de Tlaxcala y Volcán La Malinche.

Posteriormente, usando el límite de las Regiones geográficas (en formato vectorial) se realizó un recorte al mapa reclasificado de pendientes (en formato raster) con la herramienta *Clip* de ArcGis 10.3. El archivo producto del recorte se transformó a vectorial utilizando la herramienta *Raster to Polygon* de ArcGis 10.3, lo cual generó un *shapefile* con miles de polígonos de áreas diminutas (Figura 2.4).

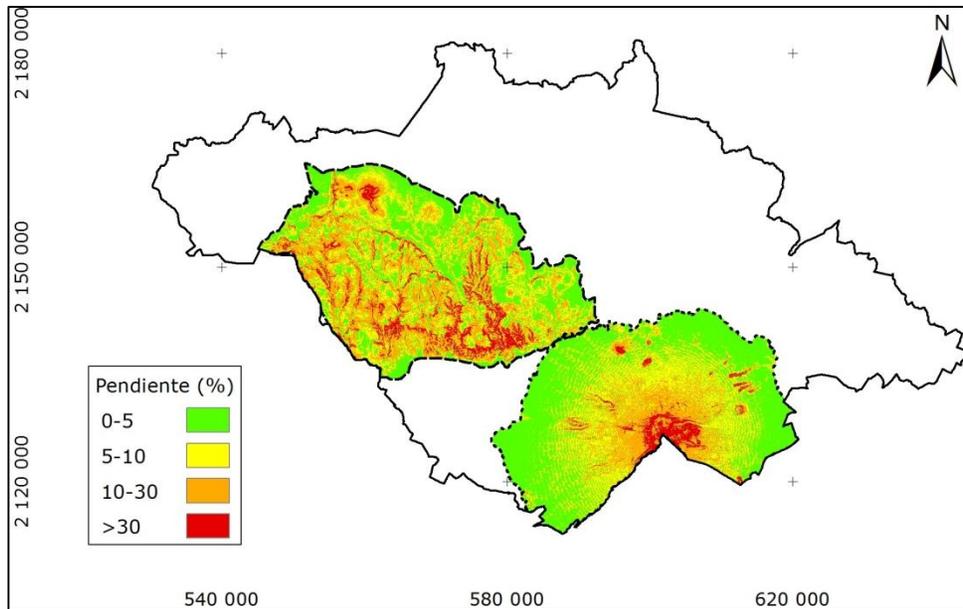


Figura 2.4. Pendientes de las Regiones Altiplano de Tlaxcala y Volcán La Malinche.

Con la finalidad de suprimir datos erróneos e innecesarios del *shapefile* producto del recorte, se realizó una limpieza automatizada de información usando la herramienta *Eliminate* de ArcGis 10.3, la cual une polígonos de superficies pequeñas para generar una capa de polígonos de mayor tamaño (Figura 2.5).

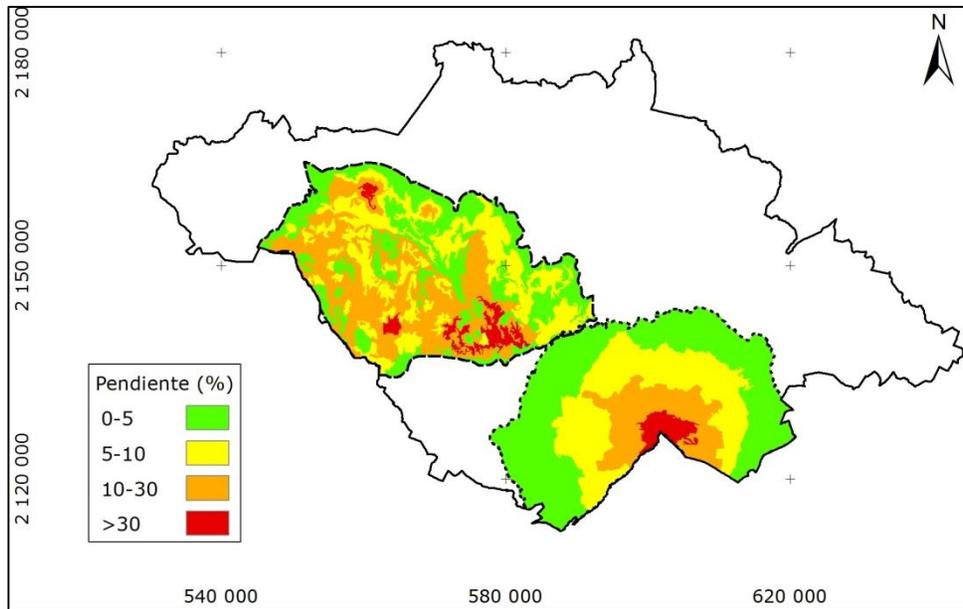


Figura 2.5. Mapa de pendientes dominantes en las Regiones Altiplano de Tlaxcala y Volcán La Malinche.

C. Estratos, Población de estudio y Marco de Muestreo

El Mapa de pendientes dominantes fue la base para clasificar las geoformas principales, mismas que representan los cinco estratos de muestreo (Figura 2.6).

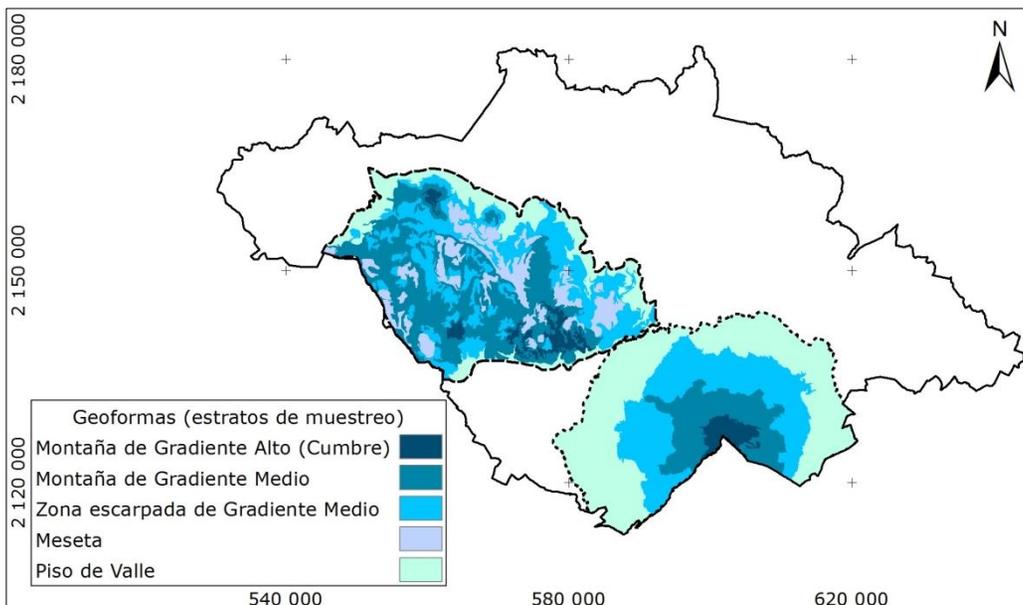


Figura 2.6. Geoformas que constituyen los estratos de muestreo.

La población de estudio se estableció seleccionando polígonos con obra cuya superficie abarca un solo estrato y excluyendo los que ocupan dos o más de éstos (Figura 2.7); así, de los de los 1,789 polígonos (de Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel y Parcela perpendicular a la pendiente) se redujo a 308 (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.3. Número de polígonos con obra, por estrato y Región geográfica.

Estrato	Altiplano de Tlaxcala	Volcán La Malinche	Total
Pie de Valle	6	45	51
Meseta	13	0	13
Zona escarpada de Gradiente Medio	79	32	111
Montaña de Gradiente Medio	121	8	129
Montaña de Gradiente Alto	4	0	4
Total	223	85	

Fuente: elaboración propia.

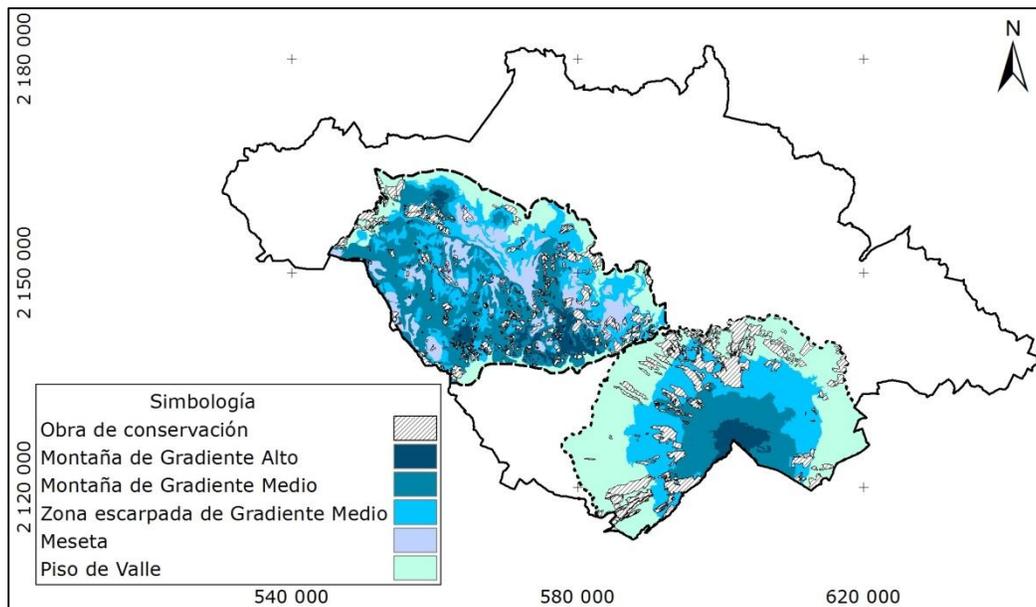


Figura 2.7. Distribución de los estratos y polígonos con obra.

El Marco de Muestreo se calculó con la media y varianza de cada estrato; para su estimación se usaron los datos de carbono orgánico (%CO) reportados en el Conjunto de datos de Perfiles de suelos, Continuo Nacional Serie II (Escala 1:250,000) del INEGI (2013b), los cuales se transformaron a porcentaje de materia orgánica (%MO) aplicando la Ecuación 2.8 (Van Bemmelen, 1892; SSS, 2011).

$$\%MO = \%CO \cdot 1.724 \quad (2.8)$$

En el estado de Tlaxcala existen seis perfiles, dos en bosque y cuatro en agricultura de temporal; de los últimos cuatros: dos fueron considerados para el Altiplano de Tlaxcala y dos para Volcán La Malinche (Cuadro 2.4 y Figura 2.8).

Cuadro 2.4. Porcentaje de carbono orgánico y materia orgánica de los perfiles de INEGI (2013b).

Región geográfica	ID Perfil	Carbono orgánico	Materia orgánica
Altiplano de Tlaxcala	14213	1.3	2.2
	14209	1.8	3.1
Volcán La Malinche	16201	0.4	0.7
	16202	0.7	1.2

Fuente: elaboración propia.

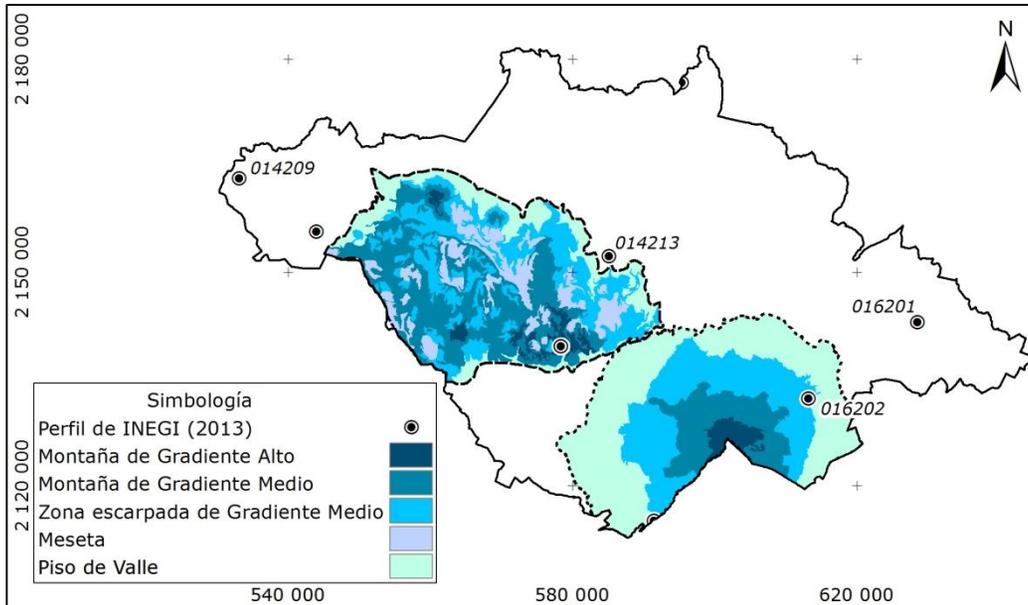


Figura 2.8. Distribución de los perfiles de INEGI (2013b) en el estado de Tlaxcala.

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección, primero se presentan los resultados de aplicar el sistema de Muestreo Estratificado, posteriormente lo obtenido con el muestreo Simple Aleatorio y Proporciones con Varianza Máxima; finalmente se hace la comparación entre sistemas.

Sistema de Muestreo Estratificado

Resolviendo la Ecuación 2.3 (con 92% de confianza) a la población de cada Región geográfica, se obtuvo un tamaño de muestra de 16 polígonos con obra de conservación, ocho por región (Cuadro 2.5).

Cuadro 2.5. Tamaño de la muestra por estrato y Región geográfica, con el sistema de Muestreo Estratificado.

Región geográfica	Estrato	Tamaño de muestra
Altiplano de Tlaxcala	Pie de Valle	0
	Meseta	1
	Zona escarpada de Gradiente Medio	3
	Montaña de Gradiente Medio	4
	Montaña de Gradiente Alto	0
Volcán La Malinche	Pie de Valle	4
	Zona escarpada de Gradiente Medio	3
	Montaña de Gradiente Medio	1

Fuente: elaboración propia.

Muestreo Simple Aleatorio y de Proporciones con Varianza Máxima

Resolviendo las Ecuaciones 2.1 y 2.2 (con 92% de confianza) a la población de cada Región geográfica, se obtuvo un tamaño de muestra de 129 y 191 polígonos con obra de conservación, respectivamente (Cuadro 2.6).

Cuadro 2.6. Tamaño de la muestra por estrato y Región geográfica, con el sistema de Muestreo Simple Aleatorio y de Proporciones con Varianza Máxima.

Región geográfica	Estrato	Tamaño de muestra	
		Muestreo Simple Aleatorio	Muestreo de Proporciones con Varianza Máxima
Altiplano de Tlaxcala	Pie de Valle	3	6
	Meseta	6	12
	Zona escarpada de Gradiente Medio	33	46
	Montaña de Gradiente Medio	51	58
	Montaña de Gradiente Alto	2	4
Volcán La Malinche	Pie de Valle	18	32
	Zona escarpada de Gradiente Medio	13	25
	Montaña de Gradiente Medio	3	8

Fuente: elaboración propia.

Comparación entre los sistemas de muestreo

Aplicar los muestreos Simple Aleatorio y Proporciones con Varianza Máxima, incrementa el tamaño de la muestra en 700% y 1,100%, respectivamente, en comparación al uso del sistema de Muestreo Estratificado, lo que implica un aumento exponencial del tiempo y costo de actividades de evaluación.

En México, el sistema de muestreo más utilizado en la evaluación de obras de conservación es el sistema de muestreo de Proporciones con Varianza Máxima, seguido de sistemas de estadística inferencial, y finalmente, el muestreo Simple Aleatorio.

La implementación los muestreos Simple Aleatorio y Proporciones con Varianza Máxima –en México–, presupone que la población de obras posee características iguales o semejantes, es decir, equipara la reforestación con la construcción de

terrazas de banco, cuando en la práctica, estas obras se establecen en escenarios diferentes (FAO, 2000). En contra parte, el sistema de Muestreo Estratificado, al considerar las diferencias entre las obras de conservación del inventario (por sus características propias y las de su entorno), genera un conocimiento más amplio y preciso de éstas.

2.6 CONCLUSIONES

El Muestreo Estratificado generó un tamaño de muestra de 16 polígonos con obra (con 92 % de confiabilidad), el cual fue menor al número de muestra obtenido con los muestreos Simple Aleatorio y Proporciones con Varianza Máxima: 129 y 191 polígonos, respectivamente.

El Muestreo Estratificado tiene el potencial de disminuir los costos de las evaluaciones al considerar un número menor de muestras, sin reducir la confiabilidad estadística que se requiere, respecto a los sistemas de muestreo comúnmente usados (muestreo Simple Aleatorio, de Proporciones con Varianza Máxima y/o estadística inferencial).

El muestreo Simple Aleatorio y Muestreo Estratificado precisan de un Marco de Muestreo, concretamente el cálculo de varianzas y medias de algunas variables de estratificación, lo que implica realizar un pre-muestreo o contar con información histórica de la población de estudio (Bai *et al.*, 2013), representando una desventaja la escasez de datos, escenario muy frecuente en nuestro país; en cambio, el muestreo de Proporciones con Varianza Máxima y los sistemas de estadística inferencial prescinden de dicha información previa (Otzen y Manterola, 2017), lo que facilita su uso, pero incrementa el costo y tiempo de las evaluaciones.

2.7 REFERENCIAS

- Badii, M.J., Castillo, J., & Guillen, A. (2008). Tamaño óptimo de la muestra. *Innovaciones de Negocios*, 5(1), 53-65.
- Bai, X., Tsiatis, A.A., & O'Brien, S.M. (2013). Doubly-robust estimators of treatment-specific survival distributions in observational studies with stratified sampling. *Biometrics*, 69(4), 830-9. DOI: 10.1111/biom.12076.
- Batjes, N.H. (2005). *SOTER-based soil property estimates for Latin America and the Caribbean*. Wageningen: ISRIC-World Soil Information.
- Cantoni, R.N.M. (2009). Técnicas de muestreo y determinación del tamaño de la muestra en investigación cuantitativa. *Revista Argentina de Humanidades y Ciencias Sociales*, 7(2).
- Cocoltetzi, P.F.J., & Ramírez, C.R. (2017). *Inventario de obras de conservación de suelo en el estado de Tlaxcala* (tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.
- CONAFOR. (2005). *Evaluación del Programa de Pago de servicios ambientales por captura de carbono y los derivados de la biodiversidad y para fomentar el establecimiento y mejoramiento de sistemas agroforestales [PSA-CABSA], Reporte final, Ejercicio fiscal 2004*. México: Comisión Nacional Forestal.
- CONAFOR. (2008a). *Evaluación Externa de los Apoyos de Reforestación Ejercicio Fiscal 2007*. México: Comisión Nacional Forestal.
- CONAFOR. (2008b). *Evaluación Externa de los Apoyos de Reforestación Ejercicio Fiscal 2007 (Evaluación de apoyos 2004-2006)*. México: Comisión Nacional Forestal.
- CONAFOR. (2010). *Informe de Evaluación Externa de los Apoyos de Reforestación Ejercicio Fiscal 2009*. México: Comisión Nacional Forestal.
- Cotler, A.H., Cram, H.S., Martínez, T.S. & Quintanar, G. E. (2013a). Forest soil conservation in central Mexico: an interdisciplinary assessment. *Catena*, 104, 280-287. DOI: 10.1016/j.catena.2012.12.005.
- Cotler, A.H., Cram, H.S., & Bunge, V. (2013b). *Evaluación de prácticas de conservación de suelos en sitios del proyecto Cuencas y Ciudades*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], Instituto de Geografía UNAM, & Fondo Mexicano de Conservación de la Naturaleza.
- Cotler, A.H., Cram, H.S., Martínez, T.S., & Bunge, V. (2013c). *Evaluación de prácticas de conservación de suelos en Pátzcuaro y Sierra Gorda*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], Instituto de Geografía UNAM, & Fundación Gonzalo Rio Arronte, A. C.

- Cotler, A.H., Cram, H.S., Martínez, T.S., & Bunge, V. (2015). Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trinchera. *Investigaciones Geográficas*, 88, 6-18. DOI: 10.14350/rig.47378.
- Cram, H.S., Quintanar, G. E., & Martínez, T. S. (2008). *Evaluación del Impacto de Acciones de Conservación de Suelos en el Centro de México*. México: Instituto Nacional de Ecología [INE].
- Dano, A.M. & Midmore D.J. (2004). Evaluation of soil and water conservation technologies in vegetable based upland production system of manupali watershed, Southern Philippines. *Conserving Soil and Water for Society: Sharing Solutions* 213:1-5.
- FAO. (2000). *Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- FAO. (2009). *Guía para la descripción de suelos* (4ª ed.). Kenya-Universidad Mayor de San Simón, Bolivia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Fernández, S.P. (1996). Determinación del tamaño muestral. *Cad Aten Primaria*, 3, 138-141.
- Freese, F. (1969). *Muestreo Forestal Elemental*. México/Buenos Aires: Agencia para el Desarrollo Internacional [A.I.D].
- Hailu, W., Moges, A., & Yimer F. (2012). The Effects of "Fanya juu" Soil Conservation Structure on Selected Soil Physical & Chemical Properties: the Case of Goromti Watershed, Western Ethiopia. *Resources and Environment*, 2(4), 132-140. DOI: 10.5923/j.re.20120204.02.
- INAFED. (2010). *Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México*. México: Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Recuperado de: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/index.html>.
- INEGI. (2001). Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional Serie I. Sistema Topoformas. Escala 1:1 000 000. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2013a). Modelo digital de elevación (MDE) LiDAR [Light Detection and Ranging] de terreno. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2013b). Conjunto de datos de Perfiles de suelos. Continuo Nacional Serie II. Escala 1:250 000. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. NEGI. México.
- INEGI. (2015). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica digital, por condensado estatal. Serie IV 29 (Tlaxcala). Escala 1:250 000. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

- Jiménez, V.J. (2001). Métodos estadísticos. En: Lacasa, A., Humet, C., & Cot, R. (edt.). *Errores de Medicación Prevención, diagnóstico y tratamiento* (125-142). Barcelona, España: EASO.
- Loch, R.J. (2004). *Soil conservation practice in search of effective solutions*. Brisbane, Australia: International Soil Conservation Organization Conference.
- Moradi, A., Teh Boon, S.C., Joo, G.K., Mohd, H.A.H., & Fauziah, I.C. (2015). Effect of four soil and water conservation practices on soil physical processes in a non-terraced oil palm plantation. *Soil and Tillage Research*, 145, 62–71. DOI: 10.1016/j.still.2014.08.005.
- Nava, H.R. (2005). *Evaluación técnica y económica de las obras de conservación el suelo y agua en el Municipio de Ixtacuixtla, Tlaxcala* (documento de seminario de titulación). Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Otzen, T. & Manterola, C. (2017). Técnicas de muestreo sobre una población a estudio. *Int. J. Morphol*, 35(1), 227-232.
- Rossi, H.P., Wright, J.D. & Anderson, A.B. (1985). *Handbook of survey research: Quantitative Studies in Social Relations* (1st ed.). New York, United States of America: Academic Press.
- SAGARPA. (2015). *Compendio de Indicadores 2014 Componente Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua [COUSSA] Tlaxcala*. México: Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- SAGARPA. (2016). *Informe de Evaluación 2014-2015, Componente Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua [COUSSA] Tlaxcala*. México: Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- SAGARPA. (2017a). *Compendio de Indicadores 2016, Programa de Productividad Rural, Componente Infraestructura Productiva Para el Aprovechamiento Sustentable de Suelo y Agua [IPASSA] Tlaxcala*. México: Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- SAGARPA. (2017b). *Compendio de Indicadores 2017, Programa de Apoyo a Pequeños Productores, Infraestructura Productiva Para el Aprovechamiento Sustentable de Suelo y Agua Tlaxcala*. México: Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Sánchez, M.P. (2012). *Evaluación de la sustentabilidad del agroecosistema maíz en la Región de Huamantla, Tlaxcala* (tesis de doctorado). Colegio de Posgraduados, Montecillos, Texcoco, Edo. de México.
- Sánchez, M.P., Ocampo, F.I., Sánchez, H. M., & Martínez, S.T. (2008). Proceso autogestivo para la conservación de suelos y agua en sistemas campesinos sustentables. Los casos de Vicente Guerrero y La Reforma, Tlaxcala. *Ra Ximhai*, 4(2), 165-181.

- SSS, Soil Survey Staff. (2011). *Soil Survey Laboratory Information Manual*. Soil Survey Investigations. In: Burt, R. (ed.). United States of America: Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Teshome, A., Rolker, D., & Graaff, J. (2013). Financial viability of soil and water conservation technologies in northwestern Ethiopian highlands. *Applied Geography*, 37:139-149. DOI: 10.1016/j.apgeog.2012.11.007.
- Van Breemen, J.M. (1982). Genesis, morphology, and classification of acid sulfate soils in Coastal Plains. in: Kittrick, J.A., Fanning, D.S., & Hossner, L.R. (eds.). *Acid sulfate weathering* (pp. 95-108). Madison, WI: Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ. 10. ASA and SSSA.
- Villa, M.I. (2014). *Valoración de obras y prácticas de conservación de suelo y agua en el estado de Puebla*. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Zhang, F., Xing, Z., Rees, H.W., & Dong, Y. (2014). Assessment of effects of two runoff control engineering practices on soil water and plant growth for afforestation in a semi-arid area after 10 years. *Ecological Engineering*, 64: 430–442. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.12.024.

CAPÍTULO III. CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA EN TLAXCALA Y SU IMPACTO SOBRE LA PRODUCTIVIDAD AGRÍCOLA Y FERTILIDAD EDÁFICA

3.1 RESUMEN

La ejecución de obras de conservación de suelo y agua para reducir o mitigar los efectos de la degradación edáfica en México es igual de relevante como la evaluación de su efectividad. Sin embargo, los reportes disponibles no informan cuantitativamente sobre el cumplimiento de sus principales metas: mejorar la calidad del suelo y beneficiar a los usuarios del área intervenida. El objetivo del presente estudio fue evaluar el impacto de las obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala sobre la productividad agrícola y fertilidad química edáfica. Se consideraron dos grupos de indicadores: socioeconómicos (sistemas de cultivo y rendimiento agrícola) y determinaciones de fertilidad química del suelo. Se emplearon los sistemas del muestreo estratificado y de parcelas pareadas, estas para comparar parcelas agrícolas con [CO] y sin [SO] obra de conservación de suelo y agua. Los sistemas de cultivo en CO y SO se basan en el mismo número y tipo de labores culturales. Las obras de conservación de suelo y agua tienden a incrementar el rendimiento de grano de maíz y los valores de los índices de fertilidad química del suelo en 7% ($p=0.717$) y 15% ($p=0.669$), respectivamente.

Palabras clave: evaluación, obras de conservación de suelo y agua, rendimiento agrícola, sistemas de cultivo, fertilidad.

CONSERVATION OF SOIL AND WATER IN TLAXCALA AND ITS IMPACT ON AGRICULTURAL PRODUCTIVITY AND EDÁFICA FERTILITY

3.2 ABSTRACT

The execution of soil and water conservation works to reduce or mitigate the effects of soil degradation in Mexico is just as relevant as the evaluation of its effectiveness; however, the available reports do not inform on the quantitative fulfillment of its main goals: to improve soil quality and benefit the users of the intervened area. The objective of the present study was to evaluate the impact of soil and water conservation works in Tlaxcala (Mexico) on productivity and soil chemical fertility. Two groups of indicators were considered: socioeconomic (farming systems and agricultural yield) and soil chemical fertility indices. Stratified sampling and paired parcel systems were used. The last one was used to compare agricultural land with [CO] and without [SO] soil and water conservation work. Farming systems in Co and SO are based on the same type and number of cultural practices. Soil and water conservation works tend to increase the corn grain yield and the values of the chemical soil fertility indices by 7% ($p=0.717$) and 15% ($p=0.669$), respectively.

Keywords: evaluation, soil and water conservation works, agricultural performance, cultivation systems, fertility.

3.3 INTRODUCCIÓN

En México se han realizado diversos tipos de obras de conservación de suelo y agua mediante múltiples programas de subsidios, algunos de ellos han sido evaluados (Cotler *et al.*, 2007). Las primeras evaluaciones de programas gubernamentales en Tlaxcala enfocados a la protección, preservación y restauración ambiental, corresponden al año 1999, cuando la entidad inició su participación en el Programa para el Desarrollo Forestal [PRODEFOR] (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2002). Este programa se centró en actividades netamente forestales como: estudios para el aprovechamiento de productos no maderables y maderables no tradicionales, infraestructura de caminos, cercados en áreas de regeneración, aclareos, pre-aclareos, apertura de brechas cortafuego y apertura de cepas; por lo que la evaluación giró en torno a dichos apoyos; estos programas no tuvieron cambios significativos durante los siguientes años.

En 2001 surgió el Programa para el Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales [PRODEPLAN] (CONAFOR, 2003) y en 2002 el Programa Nacional de Reforestación [PRONARE] (Universidad Autónoma Metropolitana [UAM], 2003), la asignación de apoyos y evaluaciones se relacionaron con actividades de aprovechamiento forestal, principalmente en la región Sierra de Tlaxco-Caldera-Huamantla.

En 2003 se implementaron los programas: Proyecto de Conservación y Manejo Sustentable de Recursos Forestales [PROCYMAF] (CONAFOR, 2004), y Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos [PSAH] (Colegio de Postgraduados [CP], 2004), pero sin inversión en el estado de Tlaxcala.

En 2004 se creó el Programa de Conservación y Restauración de Ecosistemas Forestales [PROCOREF] (CONAFOR, 2005a), y el Programa de Ordenamiento y Fortalecimiento a la Autogestión Silvícola [PROFAS] (CONAFOR, 2005b). No obstante, su inversión y evaluación se basó en actividades de reforestación y

silvícolas, respectivamente. En el mismo año surgió el Programa Pago de Servicios Ambientales por Captura de Carbono, derivados de la Biodiversidad y Establecimiento y Mejoramiento de Sistemas Agroforestales [PSA-CABSA], cuya evaluación aplicó a un sólo beneficiario en Tlaxcala y consideró indicadores cualitativos como: criterios técnicos para la selección de zonas de elegibilidad, congruencia de actividades con los operadores del programa y satisfacción de los beneficiarios con la operación del programa (CONAFOR, 2005c).

Entre 2004 y 2005 la CONAFOR amplió su catálogo de apoyos, permitiendo la construcción de presas de morillos, ramas, piedra acomodada, costales, llantas, mampostería, terrazas de muro vivo e individuales, zanja trinchera (tinas ciegas), sistema de zanja bordo, acomodo de material vegetal muerto, barreras de piedra en curvas a nivel y cabeceo de cárcavas. Esta apertura demandó la evaluación de indicadores cuantitativos que derivó en la Evaluación de los Apoyos de Reforestación, Obras y Prácticas de Conservación de Suelos y Sanidad Forestal (Universidad Autónoma Chapingo [UACH], 2007). Algunos de los indicadores ambientales evaluados fueron: impacto de las obras sobre el proceso erosivo, captura de carbono, estimación del volumen de azolve evitado, balance hidrológico, entre otros. Los indicadores socioeconómicos consistieron en: nivel de la participación de la mujer, uso eficiente de los subsidios, condición de la obra, entre otros. En Tlaxcala únicamente se evaluaron proyectos de 2004.

Posteriormente, CP (2008) evaluó obras de restauración de suelos forestales (ejercicios fiscales 2004 a 2006), que incluyó prácticas similares a CONAFOR (2004; 2005a; 2005b; 2005c), con la inclusión innovadora de tendencias ambientales (en escurrimientos y erosión potencial), así como el análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas [FODA]. UACH (2009) adoptó un análisis de pertinencia de indicadores de evaluación (p. ej.: apoyo a mujeres, uso eficiente de subsidios, uso de especies nativas, porcentaje de sobrevivencia, entre otros), en Tlaxcala se evaluaron 24 obras bajo este esquema.

Cotler *et al.* (2015) evaluaron los beneficios de las zanjas trinchera en 28 sitios distribuidos en siete estados de la república (incluido Tlaxcala), mediante la caracterización del medio físico, la descripción y análisis de suelos, así como entrevistas a los dueños de terrenos intervenidos.

Recientemente, la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA] publicó el compendio de indicadores de los componentes: Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua [COUSSA] (SAGARPA, 2015; 2016) e Infraestructura Productiva para el Aprovechamiento Sustentable de Suelo y Agua [IPASSA] (SAGARPA, 2017a; 2017b), para el estado de Tlaxcala; evaluaciones en las que se incrementó el número de índices ambientales y sociales evaluados.

En el ámbito internacional existen evaluaciones de obras de conservación de suelo y agua, a continuación, se mencionarán algunos ejemplos.

Dano y Midmore (2004) encuestaron a agricultores de la cuenca Manupali, Filipinas, con el objetivo de conocer las técnicas de producción agrícola; también establecieron parcelas de erosión-escurrimiento combinando cultivos y obras de conservación, donde midieron la tasa de erosión, escurrimientos, características fisicoquímicas del suelo, insumos y rendimiento de cultivos.

Jiménez (2010) evaluó cinco tipos de obra de conservación (terrazas, bordos, zanjas bordo, tinas ciegas y roturaciones) en el municipio de Coixtlahuaca, Oaxaca, a través del sistema de parcelas pareadas y evaluando indicadores como: rendimiento agrícola, características fisicoquímicas del suelo, inversión en insumos agrícolas, diversificación de fuentes de ingreso, entre otros.

Hailu *et al.* (2012) evaluaron el efecto sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo que tiene una obra de conservación llamada localmente Fanya juu en la cuenca

Goromti, Etiopia, compararon zonas con presencia de estas obras vs zonas sin obra.

Zhang *et al.* (2014) evaluaron en Gansu, China, el efecto de dos tipos de obra de conservación sobre: el contenido de agua en el suelo, agua total consumida y crecimiento de plantas reforestadas. Para ello tomaron paralelamente dos conjuntos de datos, el primero se recolectó en una zona de pastizal (sin intervención), el otro, en parcelas reforestadas.

Moradi *et al.* (2015), en una plantación de palma de aceite en Selangor, Malasia, evaluaron el efecto de cuatro tipos de obra de conservación sobre las propiedades físicas y contenido de agua del suelo, considerando como zona de control una plantación de palma sin obra.

Las evaluaciones hechas por dependencias gubernamentales de México orientan el rumbo de investigaciones que se desarrollen bajo este enfoque, concretamente en la selección de indicadores ambientales, sociales y económicos (cualitativos o cuantitativos). Sin embargo, a diferencia de las evaluaciones hechas en otros países, carecen del elemento testigo o zona de control, y por ello no cuantifican el impacto directo (positivo o negativo) de las obras de conservación, lo que podría derivar en conclusiones subjetivas en relación a sus dos principales metas: mejorar la calidad del suelo y beneficiar a los usuarios del área intervenida.

Al respecto, Fontaine (1989) menciona que para identificar el beneficio de un proyecto es necesario definir una situación base, la comparación entre lo que sucede con proyecto y lo que hubiera sucedido sin él, define el beneficio pertinente del mismo. Al respecto el sistema de parcelas pareadas (Jiménez, 2010; Hailu *et al.*, 2012; Moradi *et al.* 2015) permite comparar características de dos terrenos contiguos en los que diversos agentes y factores son similares; en el caso de evaluación de obras de conservación, dicho sistema estudia y compara parcelas con obra y parcela colindante sin intervención alguna, que sirve como referencia.

Evaluar las obras de conservación bajo este sistema permitirá conocer su efectividad frente a los problemas de erosión y productividad agrícola. También coadyuvará a establecer alternativas para optimizar su funcionamiento, promover el aprovechamiento racional de los recursos naturales y orientar acciones futuras de programas gubernamentales.

Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue analizar el impacto de las obras de conservación de suelo y agua sobre la fertilidad química del recurso edáfico, el rendimiento agrícola y los sistemas de cultivo mediante muestreo estratificado y parcelas pareadas.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio y tipo de obra

En el presente estudio se consideraron dos de los cuatro tipos de obra de conservación de suelo y agua (Cuadro 3.1) incluidos en el inventario de Tlaxcala (Cocoletzi y Ramírez, 2017). Se seleccionaron: Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel y Parcela perpendicular a la pendiente; esto para dos Regiones geográficas de Tlaxcala, como se indica adelante.

Cuadro 3.1. Tipos y número de polígonos con obras de conservación de suelo y agua en Tlaxcala.

Tipo de obra	Número de polígonos	Superficie (km ²)	Porcentaje
Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel	1,291	1,127	58
Parcela perpendicular a la pendiente	498	416	22
Conservación forestal	585	226	12
Área urbana con parcelamientos	95	164	8
Total	2,469	1,933	100

Fuente: elaboración propia, con información de Cocolletzi y Ramírez (2017).

Entre las ocho regiones que existen en Tlaxcala (INAFED, 2010), las estudiadas fueron: Altiplano de Tlaxcala [AT] y Volcán La Malinche [VM] (Figura 3.1), debido a que concentran el 50% de la superficie de las obras del inventario (Cocolletzi y Ramírez, 2017).

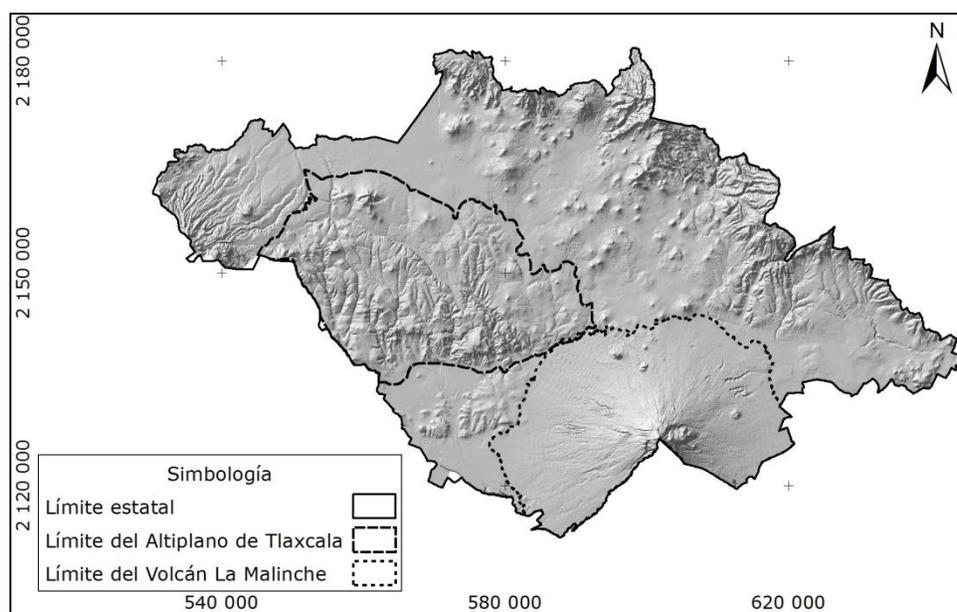


Figura 3.1. Polígonos de las Regiones geográficas Altiplano de Tlaxcala y Volcán La Malinche.

Mediante el uso de sistemas de información geográfica [SIG] se delimitaron cinco geoformas principales dentro de las dos Regiones geográficas, las cuales representaron cinco estratos de muestreo (Figura 3.2).

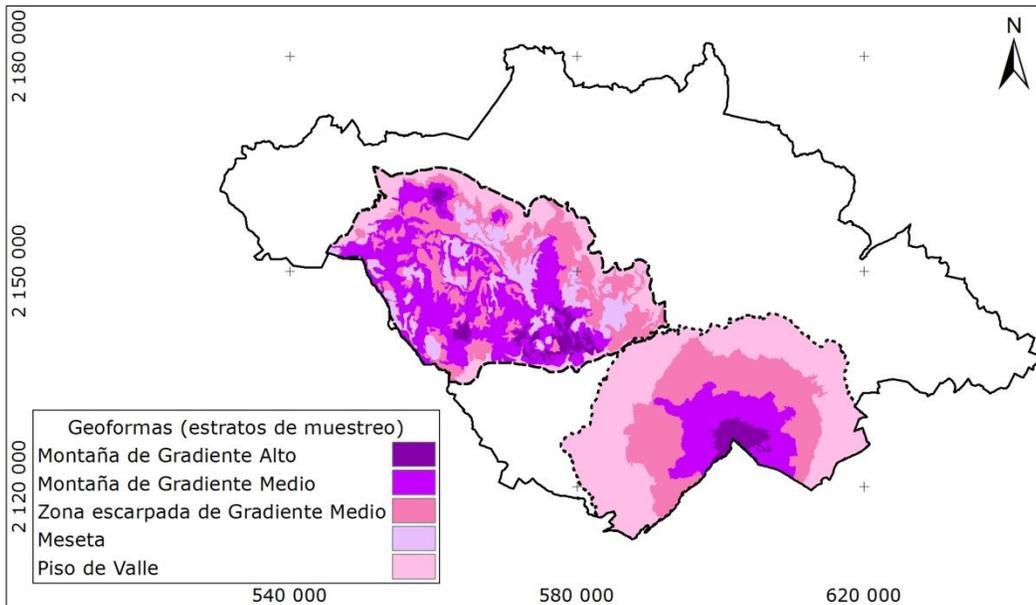


Figura 3.2. Geoformas que constituyen los estratos de muestreo.

La población de estudio se estableció seleccionando polígonos con obra cuya superficie abarca un solo estrato, y excluyendo los que ocupan dos o más de éstos (Figura 3.3); así, de los de los 1,789 polígonos de: Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel y Parcela perpendicular a la pendiente, se redujo a 308 (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2. Número de polígonos con obra, por estrato y Región geográfica.

Estrato	Altiplano de Tlaxcala	Volcán La Malinche
Pie de Valle	6	45
Meseta	13	0
Zona escarpada de Gradiente Medio	79	32
Montaña de Gradiente Medio	121	8
Montaña de Gradiente Alto	4	0
Total	223	85

Fuente: elaboración propia.

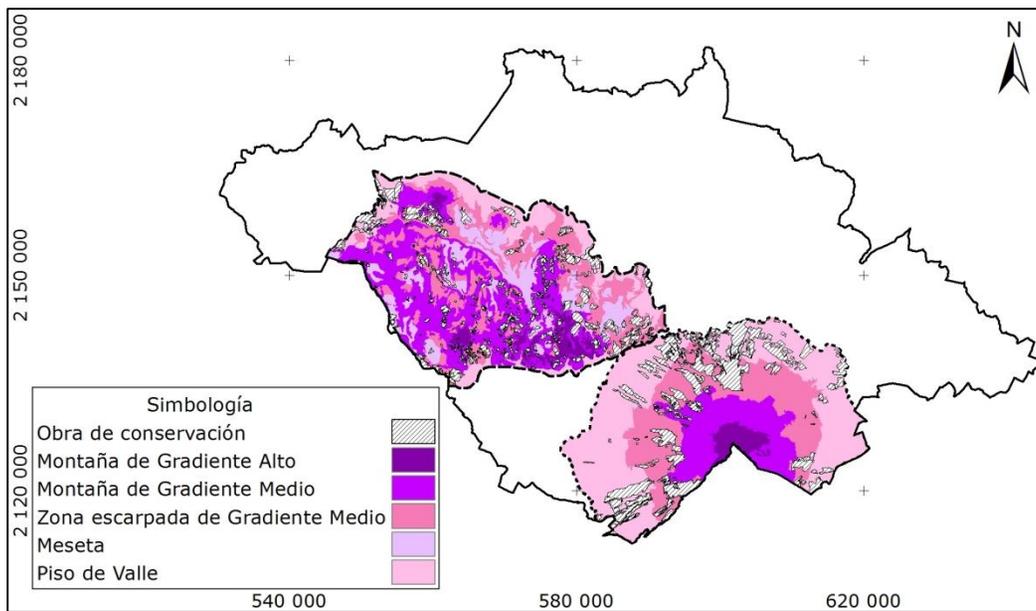


Figura 3.3. Distribución de la población de estudio en las Regiones Altiplano de Tlaxcala y Volcán La Malinche.

Sistema de Muestreo Estratificado

A cada Región geográfica se aplicó un sistema de Muestreo Estratificado (con un nivel de confianza de 92%, Ecuación 3.1) (Jiménez, 2001; Bai *et al.*, 2013).

$$n = \frac{\sum_{i=1}^L N_i^2 s_i^2}{N^2 V + \sum N_i s_i^2} \quad (3.1)$$

Donde: n = tamaño de la muestra; L = número de estratos; N_i = número de elementos del estrato i ; s_i^2 = varianza del estrato i ; N = tamaño de la población de estudio; V = precisión o margen de error.

El resultado fue un tamaño de muestra de 16 polígonos con obra de conservación [CO], ocho por región. Para utilizar el sistema de parcelas pareadas (Jiménez, 2010; Hailu *et al.*, 2012; Moradi *et al.* 2015) se eligieron aleatoriamente –mediante técnicas de percepción remota y SIG– 16 polígonos más sin obra de conservación [SO], también ocho por región, dando un total de 32 polígonos o parcelas pareadas.

La selección de los 16 polígonos CO de la muestra se hizo aleatoriamente, eligiendo ocho entre los 85 del Volcán La Malinche y ocho entre los 223 del Altiplano de Tlaxcala. Para ello se calculó el centroide de cada polígono mediante el comando *Feature To point* de ArcGis 10.3; posteriormente, se asignó un número identificador [ID] al centroide y se creó una lista en Microsoft Excel 365. Para evitar preferencias de muestreo y garantizar que los 85 y 223 polígonos tengan la misma posibilidad de ser muestreados, se utilizó la función *ALEATORIO.ENTRE* de Microsoft Excel 365, estableciendo un intervalo cerrado desde 1 hasta 85 y 1 hasta 223 (según la región), este último paso se repitió 16 veces (ocho por Región geográfica). En la Figura 3.4 se observa la distribución de los 32 polígonos o parcelas pareadas, y en la Cuadro 3.3 se muestran sus metadatos.

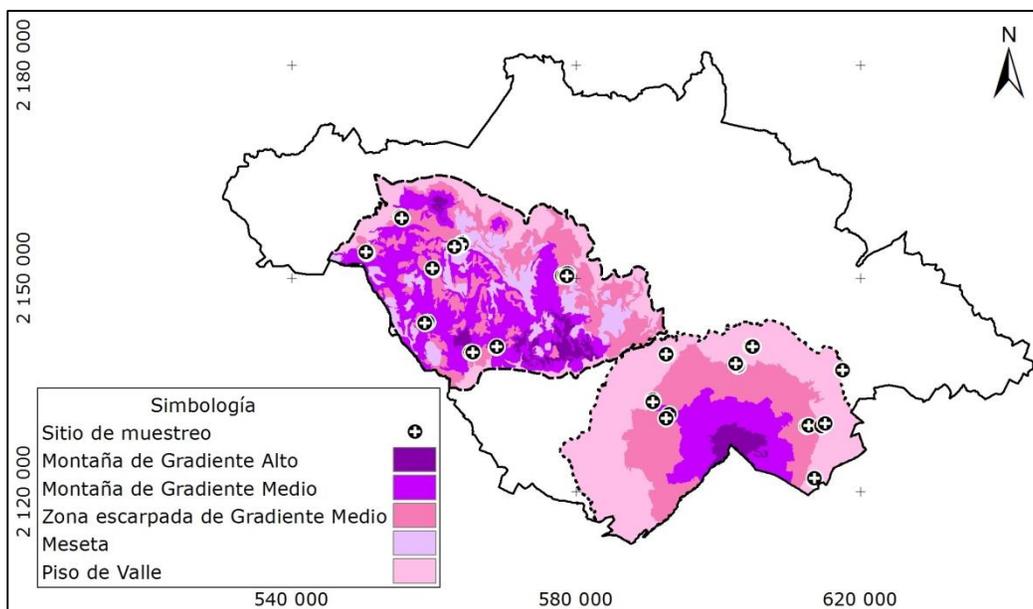


Figura 3.4. Distribución de las 32 parcelas pareadas en las Regiones geográficas.

Cuadro 3.3. Metadatos de las 32 parcelas pareadas.

Región geográfica	Parcela	Longitud	Latitud	Tipo de obra
VM	1	613552	2121698	Parcela con obra perpendicular a la pendiente
	2	567478	2155720	Parcela sin obra
	3	614505	2129229	Parcela perpendicular a la pendiente
	4	566845	2156946	Parcela sin obra
	5	617447	2137143	Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel
	6	559831	2151447	Parcela sin obra
	7	604611	2140417	Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel
	8	578655	2150360	Parcela sin obra
	9	612767	2129238	Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel
	10	578143	2150069	Parcela sin obra
	11	602418	2137968	Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel
	12	567751	2139802	Parcela sin obra
	13	590773	2132875	Parcela perpendicular a la pendiente
	14	550511	2153732	Parcela sin obra
	15	593103	2130886	Parcela perpendicular a la pendiente
	16	555478	2158480	Parcela sin obra

Región geográfica	Parcela	Longitud	Latitud	Tipo de obra
AT	17	567358	2155702	Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel
	18	613632	2121826	Parcela sin obra
	19	563959	2154981	Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel
	20	615085	2129582	Parcela sin obra
	21	559834	2151214	Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel
	22	617421	2136896	Parcela sin obra
	23	578786	2150674	Parcela perpendicular a la pendiente
	24	604765	2140478	Parcela sin obra
	25	578063	2150357	Parcela perpendicular a la pendiente
	26	612474	2129308	Parcela sin obra
	27	568774	2140327	Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel
	28	602585	2137938	Parcela sin obra
	29	550497	2153500	Parcela perpendicular a la pendiente
	30	590833	2133196	Parcela sin obra
	31	555304	2158634	Agricultura con obra siguiendo curvas a nivel
32	593222	2131155	Parcela sin obra	

Fuente: elaboración propia.

Selección de Indicadores de evaluación

Con base en la revisión documental de evaluaciones (nacionales e internacionales), y con el propósito de conocer la influencia que tienen las obras de conservación, se establecieron indicadores socioeconómicos y de fertilidad edáfica. Los primeros buscan comprender la funcionalidad de las obras dentro del proceso productivo (De Graaff *et al.*, 2010); los otros, contrastar las condiciones edáficas de ambos escenarios (con obra y sin obra), explicadas no solo por la existencia de obra, sino por el conjunto de prácticas que implementan los agricultores.

Las determinaciones de fertilidad química del suelo fueron: pH, CE, N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y materia orgánica [MO]. Los indicadores socioeconómicos se refieren a: Sistema de cultivo y Rendimiento agrícola.

Obtención de los indicadores ambientales y socioeconómicos

El sistema de cultivo se analizó a través del itinerario técnico [IT], definido por Sébillote (1974), citado por Flores (2000), como la secuencia lógica de las prácticas o técnicas culturales aplicadas a un cultivo. Se construyó un IT por cada Región geográfica y por escenario (parcelas con obra y sin obra); para ello se aplicó una encuesta a cada agricultor de las 32 parcelas pareadas, la cual se basó en Apollin y Eberhart (1999) y SAGARPA (2000), quienes sugieren indagar en: a) fuerza de trabajo, b) medio explotado y c) prácticas campesinas.

Las determinaciones de fertilidad química del suelo se midieron en cada una de las 32 parcelas pareadas, para ello se analizó una muestra compuesta, conformada por cinco submuestras (0-30 cm) tomadas al azar, atravesando transversalmente las líneas de cultivo y los accidentes naturales como la pendiente y red de drenaje; según Peterson y Calvin (1986) el esquema descrito es el más usado en edafología. Las determinaciones se realizaron en el Laboratorio de Fisiología Vegetal del CP, con los procedimientos descritos en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2002).

El rendimiento agrícola se estimó por el método pre-cosecha (Lafitte y Edmeades, 1994; Flores *et al.*, 2011; Navarro *et al.*, 2004; Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo [CIMMYT], 2012), que asocia el número y peso de granos de la muestra de mazorcas, y el número de mazorcas extraídas de la unidad muestral (promedio), esta última conformada por tres submuestras de 2.6 m² cada una.

Las encuestas y los muestreos de suelo se realizaron en los meses de octubre y noviembre del 2018. El muestreo de rendimiento se efectuó en noviembre y diciembre –del mismo año– en pácelas con maíz por ser el cultivo predominancia en Tlaxcala (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2017).

Análisis del factor clima

El crecimiento, desarrollo y rendimiento de un cultivo está relacionado con la interacción de algunos factores que los agricultores no pueden controlar, por ejemplo, los del clima (Jenny, 1941; Laird, 1965; Villalpando, 1975; Volke, 1981; Nieves, 1995; Turrent *et al.*, 2005). Entre ellos, la precipitación es muy relevante en la agricultura de temporal, como la que se practica en la zona de estudio; sin embargo, el Servicio Meteorológico Nacional [SMN] reporta la lluvia de únicamente tres de las 14 estaciones que ahí se distribuyen (Cuadro 3.4 y Figura 3.5).

Cuadro 3.4. Estaciones meteorológicas distribuidas en la zona de estudio.

Región Geográfica	ID de estación	Nombre	Latitud	Longitud	Información de precipitación (año 2018)
Región Altiplano de Tlaxcala	29010	Hueyotlipan	568743	2153186	No
	29016	Nanacamilpa (DGE)	549009	2154338	No
	29017	Nanacamilpa (SMN)	547229	2152563	No
	29024	Sanctorum	557087	2155137	No
	29030	Tlaxcala de Xicontecatl (DGE)	579100	2136850	No
	29039	Escuela Agropecuaria Nanacamilpa	549844	2156001	No
	29040	Ixtacuixtla	566598	2137132	No
	29047	Españita	560667	2151607	No
Región Volcán La Malinche	29011	Huamantla	614404	2136152	Si
	29026	Zitlaltepec	614794	2123348	Si
	29042	Amamax de Guerrero	588125	2138994	No
	29050	Teolocholco	585871	2126810	No
	29169	Zacatelco	579565	2125282	Si
	29170	San Pablo del Monte	586774	2113757	No

Fuente: elaboración propia, con información de SMN (2020a)

Con el propósito de asignar un valor estimado a las 11 estaciones sin información, se generaron capas interpoladas de precipitación usando datos de ocho estaciones distribuidas en el estado de Tlaxcala (Cuadro 3.5), esto con la herramienta de interpolación *Kriging* de ArcGis 10.3 que pondera valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones (Johansson y Chen, 2003; Hijmans *et al.*, 2005; Chen y Liu, 2012; Li y Heap, 2014).

Cuadro 3.5. Estaciones meteorológicas con información de precipitación (año 2018) utilizadas para interpolar la distribución espacial de la lluvia.

ID	Nombre	Latitud	Longitud
29003	Atlanga San José	568743	2153186
29007	El Carmen	642088	2136575
29008	Cuapixtla	549009	2154338
29011	Huamantla	614404	2136152
29026	Zitlaltepec	614794	2123348
29035	Calpulalpan	545738	2165740
29166	Observatorio, Tlax.	583999	2145282
29169	Zacatelco	579565	2125282

Fuente: elaboración propia, con información de SMN (2020a)

Adicionalmente, para conocer la precipitación históricas se analizaron las Normales Climatológicas 1951-2010 (SMN, 2020b) de las 14 estaciones distribuidas en la zona de estudio (Cuadro 3.4), las cuales se conforman de valores medios de precipitación, calculados con datos recabados durante un periodo de 59 años, al respecto, la Organización Meteorológica Mundial [OMM] (2012) sugiere que la información mínima con la que debe contar una estación es de 20 años, por otro lado, Guttman (1994) propone series de ≥ 50 años.

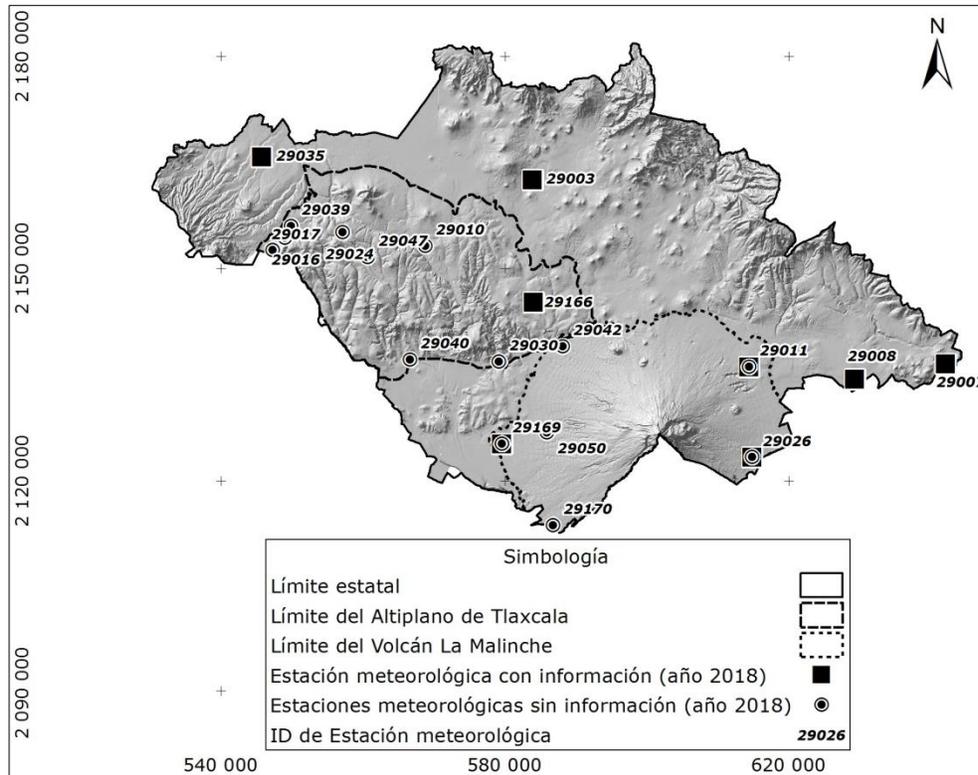


Figura 3.5. Distribución de las estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis de precipitación y su relación en el rendimiento agrícola.

Pruebas estadísticas de asociación y comparación

Los índices de fertilidad y el rendimiento de grano se compararon –entre parcelas CO y SO– mediante una Prueba de Hipótesis [PH], en cada Región geográfica. Ésta también se realizó para comparar el rendimiento del presente estudio y el reportado por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP] (SIAP, 2020), correspondiente al ciclo primavera-verano 2018 de agricultura de temporal de los 11 municipios donde se realizaron los muestreos de rendimiento. Las PH corresponden a pruebas de T de Student (para muestras independientes de variables aleatoria-numéricas) con un nivel de error (o significancia) del 5% y un nivel de confianza de 95%.

Para conocer el grado de variación conjunta existente entre los IT de parcelas CO y SO se realizó una prueba de correlación de Pearson y su significancia.

Las pruebas estadísticas de asociación y comparación se hicieron con el software SPSS Statistics 22.

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos respecto a la evaluación de indicadores socioeconómicos y ambientales por Región geográfica.

Región Volcán La Malinche

A. Sistema de cultivo

Con base en las encuestas aplicadas en la región Volcán La Malinche, se definió el IT del sistema de cultivo de maíz para parcelas CO y SO (Figura 3.6), basado en el conjunto de prácticas más frecuentes que implementan los agricultores.

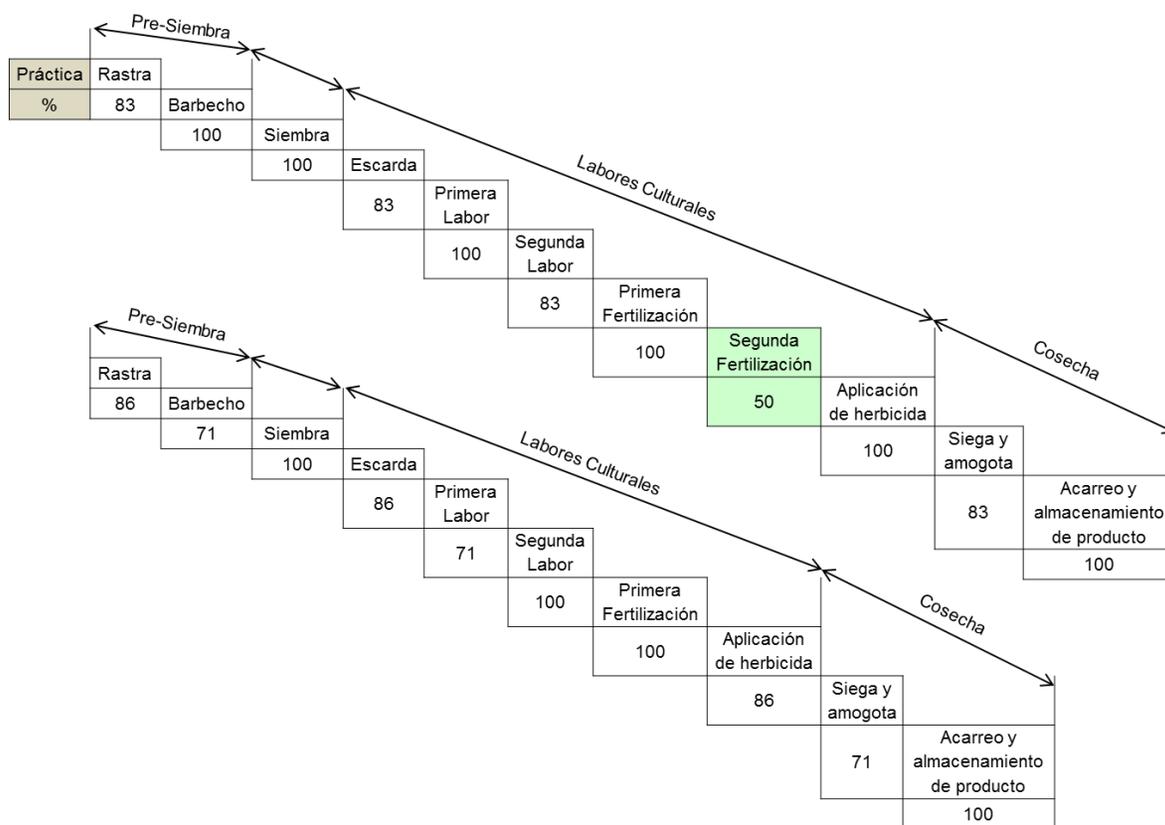


Figura 3.6. Itinerarios técnicos en parcelas con obra (arriba) y sin obra (abajo), región Volcán La Malinche.

Con base en la frecuencia de prácticas agrícolas y la información obtenida a través de las encuestas, se realizó la prueba de correlación de Pearson y de significación a los IT de parcelas CO y SO (Figura 3.7), obteniendo un coeficiente de correlación de 0.82 ($p \leq 0.01$).

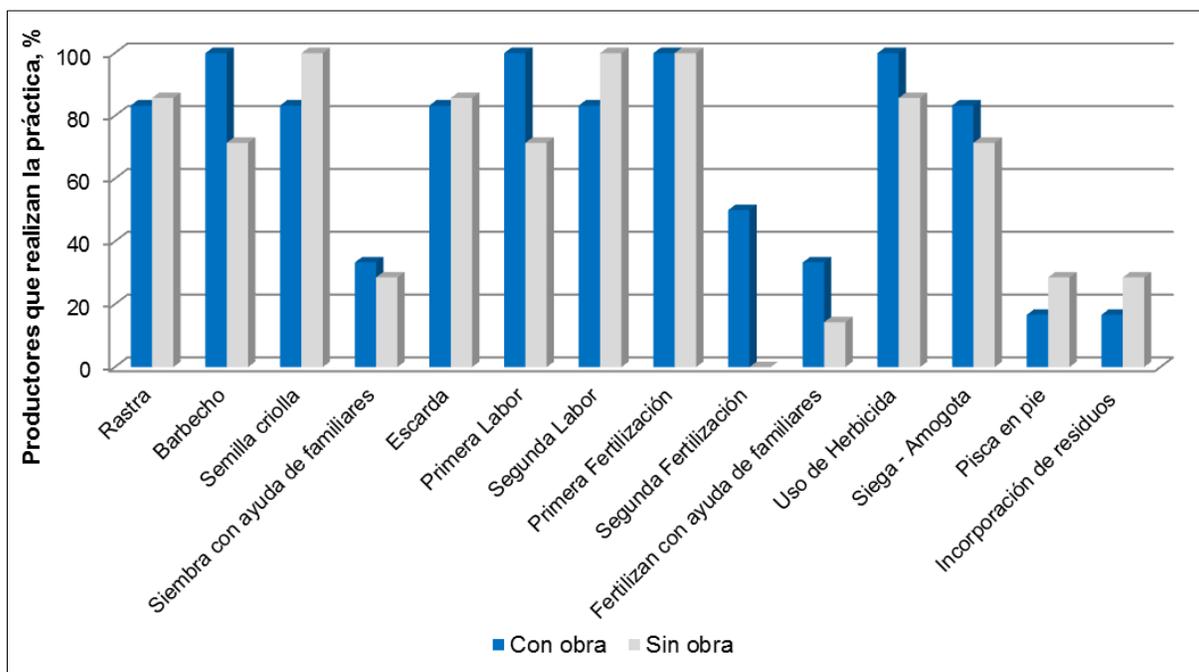


Figura 3.7. Comparación de los Itinerarios técnicos entre parcelas con obra y sin obra, región Volcán La Malinche.

Pre-Siembra. La rastra y barbecho se realizan en ambos escenarios (parcelas CO y SO). Estas prácticas son realizadas por los agricultores de la región con tractor propio (23%) o alquilado (77%).

La rastra es la palabra coloquial que se usa para indicar el paso de un arado de discos con el propósito de abrir la capa superficial del suelo, romper terrones, borrar el surco y trocear residuos del cultivo anterior, todo ello sin invertir significativamente el sustrato. El barbecho se refiere al paso de una grada (de disco o de reja) que tiene como objetivo invertir el suelo (25-30 cm) para desmoronar mejor los terrones,

umentar la infiltración de agua, favorecer la aireación, eliminar malezas e incorporar restos de rastrojo.

Siembra. El 92% de los agricultores de esta región siembran maíz criollo, el resto utiliza semilla mejorada. La fuente de semilla criolla es la mazorca de variedades locales cultivadas y cosechadas año con año por los mismos agricultores, la mayoría selecciona la semilla en su propia cosecha, en pocos casos recurren al intercambio con otros agricultores. Los criterios de selección de la mazorca son cualitativos: debe ser grande, con hileras rectas, llenado completo, granos de buen tamaño y libre de plagas o enfermedades. El 100% selecciona la mazorca en casa, y no en el terreno de cultivo; Flores (2000) señala que los inconvenientes en este tipo de selección es que la mazorca probablemente no venga de plantas desarrolladas en competencia completa, por lo que al sembrar la semilla en condiciones más restrictivas, no logrará su potencial productivo; así mismo, Hernández *et al.* (1993) señalan que la diseminación de polen proveniente de plantas indeseables (raquíicas, enfermas, tardías, etc.), que de manera natural se da en los maíces criollos, podría disminuir el potencial productivo del maíz.

Labores Culturales. En esta etapa se realizan las prácticas de cultivo llamadas localmente: escarda, primera labor y segunda labor, su propósito es acumular suelo en la línea de siembra para proporcionar mayor estabilidad a la planta, promover el desarrollo de raíces y eliminar algunas malezas. Las prácticas difieren en el momento de su ejecución, el cual es condicionado por la altura de la planta: la escarda, primera labor y segunda labor se llevan a cabo cuando la planta tiene 10, 30 y 80 cm, respectivamente.

La primera labor es más frecuente en parcelas con obra, en tanto la escarda y segunda labor lo son en parcelas sin obra. El 77% de los agricultores de esta región rentan un tractor para efectuarlas.

Fertilización. El 77% de los encuestados de esta región fertiliza con ayuda de familiares, el resto contrata mano de obra (jornales). En parcelas sin obra realizan una sola aplicación de fertilizante, en parcelas con obra realizan dos aplicaciones, pero solo por el 50% de agricultores. En la Cuadro 3.6 se indica la dosis y el nombre de fertilizante que aplican.

Cuadro 3.6. Características de fertilización en la región Volcán La Malinche.

	Unidad	Parcelas sin obra	Parcelas con obra	
		Fertilización Primera (y única)	Primera	Segunda
Fertilizante		Urea	Urea	DAP
Dosis	kg·ha⁻¹	400	190	100
Productores	%	71	33	17
Fertilizante		SA	Urea	Triple 17
Dosis	kg·ha⁻¹	1,000	190	80
Productores	%	14	33	17
Fertilizante		DAP	DAP	KCL
Dosis	kg·ha⁻¹	100	100	50
Productores	%	14	33	17
Suma	%	≈100	≈100	≈50

SA, Sulfato de amonio; DAP, Fosfato diamónico; KCl, Cloruro de potasio.

Control químico de malezas. El uso de herbicida es más frecuente en parcelas con obra, y el 50% de estos agricultores aplica un sólo herbicida, el resto aplica dos. En parcelas sin obra, el 57%, 29% y 14% aplica dos, uno y ningún tipo de herbicida, respectivamente (Cuadro 3.7). El 100% de agricultores que usan herbicida lo aplican con bomba de mochila (motor o manual), ya sea pagando jornales o con ayuda de familiares.

Cuadro 3.7. Aplicación de herbicidas en la región Volcán La Malinche.

	Unidad	Parcelas con obra			Parcelas sin obra				
		Un herbicida	Dos herbicidas		Uno herbicida	Dos herbicidas			
Herbicida		Est	Ges	+	Hier	Hier	Ges	+	Hier
Dosis	L·ha⁻¹	1.0	1.0		1.0	7.0	1.0		2.0
Productores	%	17	17			29	14		
Herbicida		Hier	Hier	+	Atr*		Hier	+	Atr*
Dosis	L·ha⁻¹	5.3	1.0		1.5		0.8		1.3
Productores	%	33	33				29		
Herbicida							2.4 D	+	Atr*
Dosis	kg·ha⁻¹						0.5		1.0
Productores	%						14		
Suma	%	50	50			29	57		

Est, Esteron; Hier, Hierbamina; Ges, Gesaprim K90; Atr, Atrazina; *kg·ha⁻¹

Cosecha. El 77% de agricultores de esta región, siegan y forman mogotes, para después pisca; el resto pisca en pie, es decir, extrae la mazorca directamente de la planta (sin segar ni formar mogotes). El 77% los encuestados de esta región extraen el zacate (planta de maíz sin mazorca) de la parcela para venderlo como forraje, el resto lo conserva en el terreno para incorporarlo en el próximo ciclo agrícola.

La siega es el proceso de cortar la planta de maíz (con mazorca) al ras del suelo. El conjunto de plantas acomodadas de manera piramidal forman el mogote, cuya función es conservar la planta en la parcela hasta que el grano alcance aproximadamente 20% de humedad (SAGARPA, 2001); después se extrae la mazorca de su hoja (pisca) y empaqueta en costales para su traslado a la casa del agricultor, donde se espera que la humedad del grano disminuya a 14% (SAGARPA, 2001), entonces se desgrana la mazorca, se almacena y eventualmente se vende el grano de maíz.

Periodo de las prácticas culturales. En la Figura 3.8 se muestra el periodo en que fueron ejecutadas las prácticas de cultivo por la mayoría de los agricultores, destacando que:

- En parcelas con obra se realizaron actividades de Pre-Siembra entre la segunda quincena (2Q) de noviembre y 2Q enero; mientras que en parcelas sin obra se llevaron a cabo en un periodo más corto, entre la 2Q diciembre y 2Q enero.
- La Siembra se llevó a cabo en ambos escenarios (parcelas CO y SO) en el mes de marzo.
- Las Labores Culturales tuvieron una duración de cuatro quincenas, en parcelas sin obra iniciaron en la primera quincena (1Q) de mayo, y en parcelas con obra, la 2Q del mismo mes.
- La Cosecha se realizó en ambos escenarios (parcelas CO y SO) entre la 2Q noviembre y 1Q diciembre.

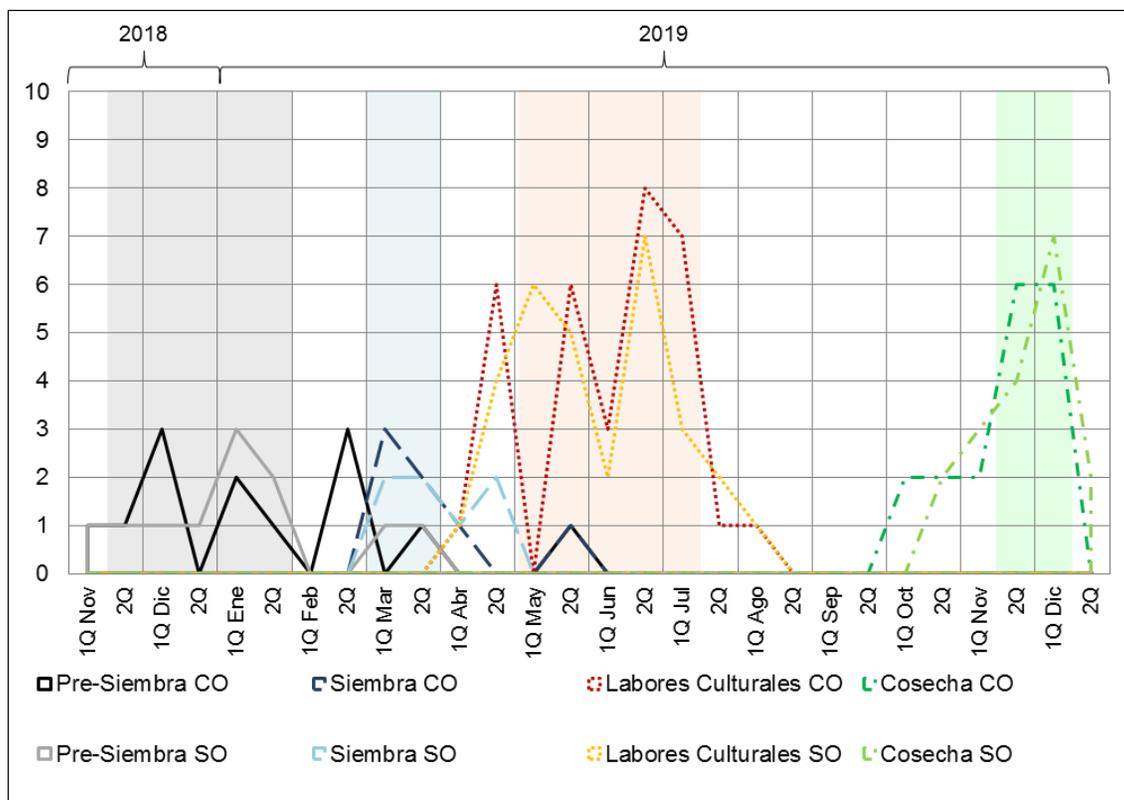


Figura 3.8. Periodo de ejecución de prácticas agrícolas en parcelas con obra [CO] y sin obra [SO], región Volcán La Malinche.

El proceso productivo del maíz en parcelas con obra es un mes más amplio en comparación a parcelas sin obra, esto podría deberse a la segunda fertilización que se realiza en parcelas con obra.

La mano de obra familiar es un elemento principal en el manejo tecnológico de los cultivos en ambos escenarios y regiones, pues interviene en el 50% de las actividades del IT.

B. Fertilidad del suelo

La Cuadro 3.8 muestra los valores de las determinaciones de fertilidad de suelos, cada valor es el promedio de ocho datos, correspondientes a ocho parcelas.

Cuadro 3.8. Resultados de análisis de suelo de la región Volcán La Malinche.

Parcela	pH	CE	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	MO
		ds/m	%	ppm	---	meq/100g	---	----- ppm -----				%
Con obra	5.8	0.1	0.1	48.3	0.2	6.6	3.1	36.6	26.8	1.8	0.7	2.7
Sin obra	5.7	0.1	0.1	47.4	0.3	6.1	2.8	36.5	12.9	1.0	0.5	2.8
Clasificación*												
	Disponibilidad Baja						Moderadamente ácido					
	Disponibilidad Media						Efectos despreciables de la salinidad					
	Disponibilidad Alta						Concentración Baja					
	Disponibilidad Muy Alta											

* NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Las parcelas CO y SO presentaron la misma clasificación de fertilidad edáfica en 11 determinaciones, sólo Mg y Zn tuvieron disponibilidad Alta en parcelas con obra y Media en parcelas sin obra. Los índices de fertilidad revelan deficiencias nutrimentales en ambos escenarios, principalmente en N, K y Cu, por lo que es recomendable aplicar una formula rica en N, considerado el macroelemento más importante en los agroecosistemas, dada su participación en múltiples reacciones bioquímicas implicadas en el crecimiento, desarrollo y producción de cultivos (Rao, 2009).

En general se observó que los suelos de parcelas con obra tuvieron niveles de nutrientes ligeramente más altos en 19% ($p=0.700$) en relación a los suelos de parcelas sin obra. Estos resultados son similares a lo obtenido por Moradi *et al.* (2015) y Zhang *et al.* (2014), quienes reportaron valores más altos ($p\leq 0.05$) en parcelas con obra.

C. Rendimiento Agrícola

En la Figura 3.9 se muestran los valores de rendimiento estimado, cada valor es el promedio de un grupo de ocho parcelas con obra y ocho sin obra.

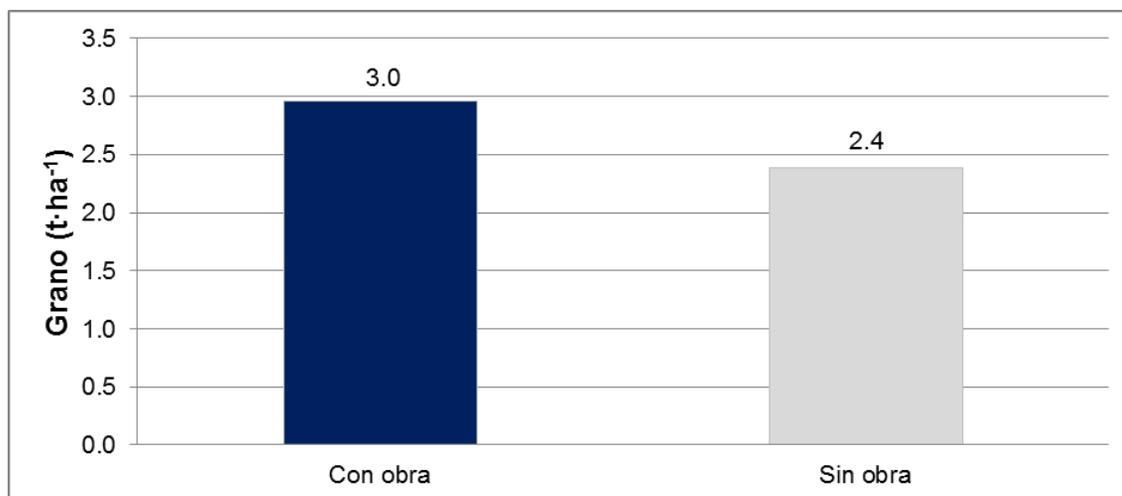


Figura 3.9. Rendimientos de maíz estimados en la región Volcán La Malinche.

El rendimiento agrícola entre parcelas CO y SO no se diferenció estadísticamente ($p=0.962$). Al parecer la segunda fertilización no fue suficiente para que el rendimiento fuera estadísticamente mayor en parcelas con obra.

La PH realizada entre el promedio de rendimiento de grano de maíz de 16 parcelas pareadas –de esta Región geográfica– y el promedio homólogo reportado para el mismo año por SIAP (2020) en los cuatro municipios donde se distribuyen dichas parcelas (Cuaxomulco, Huamantla, Ixtenco y Ziltlaltépec), indicó que no se diferencian significativamente ($p \leq 0.05$), lo que sugiere que a través del Muestreo Estratificado (con 92% de confianza) es posible obtener información representativa y extrapolable a las 23,289 ha que se cultivan con maíz en la zona estudiada, a partir de una pequeña muestra.

D. Análisis del factor clima

En la Cuadro 3.9 y Cuadro 3.10 se muestran los datos ponderados de Precipitación Promedio Mensual [PPM] ponderada del año 2018 y del periodo 1951-2010 (SMN, 2020b), respectivamente, para la región Volcán La Malinche. En la Figura 3.10 se observa la distribución espacial de la PMP ponderada del año 2018.

Cuadro 3.9. Precipitación Promedio Mensual ponderada del año 2018 en la región Volcán La Malinche.

ID de estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
	mm												
29011	10.2	8.5	8.6	88.9	64.7	140.5	14.5	94.3	73.8	87.4	47.1	0.0	638.5
29026	15.0	34.3	18.5	114.0	67.7	205.0	39.7	168.5	89.8	80.0	133.6	3.5	969.7
29042	4.8	13.9	7.1	84.5	48.7	180.1	55.7	156.5	142.7	82.1	61.7	2.2	840.0
29050	4.7	6.8	11.6	84.5	48.7	180.1	62.3	145.0	154.9	104.8	61.7	2.2	867.3
29169	2.2	0.2	14.8	78.2	68.0	243.8	69.2	141.4	166.1	115.3	86.2	0.0	985.4
29170	4.9	9.9	13.7	84.5	48.7	180.1	60.7	144.8	140.6	107.4	61.7	2.2	859.2
Promedio	7.0	12.3	12.4	89.1	57.8	188.3	50.4	141.8	128.0	96.2	75.3	1.7	860.0

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 3.10. Precipitación Promedio Mensual (1951-2010) de las estaciones meteorológicas distribuidas dentro de la región Volcán La Malinche.

ID de estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
	mm												
29011	8.1	8.5	14.1	39.4	76.5	124.6	103.3	118.5	96.3	48.5	13.7	6.1	657.6
29026	16.5	13.9	22.9	58.2	105.8	152.4	112.1	127.7	102.1	58.8	16.0	7.3	793.7
29042	10.3	4.8	11.5	34.3	65.9	135.4	125.2	127.6	126.3	61.7	12.7	4.4	720.1
29050	11.0	4.1	9.4	31.0	65.7	133.8	126.8	153.0	142.6	68.9	12.9	2.1	761.3
29169	8.3	8.0	9.9	31.3	65.7	158.5	143.1	180.4	161.9	60.3	14.6	3.7	845.7
29170	4.4	10.1	7.2	40.2	76.8	141.8	135.4	165.2	152.9	49.2	9.8	1.7	794.7
Promedio	9.8	8.2	12.5	39.1	76.1	141.1	124.3	145.4	130.4	57.9	13.3	4.2	762.2

Fuente: elaboración propia, con Normales Climatológicas (SMN, 2020b).

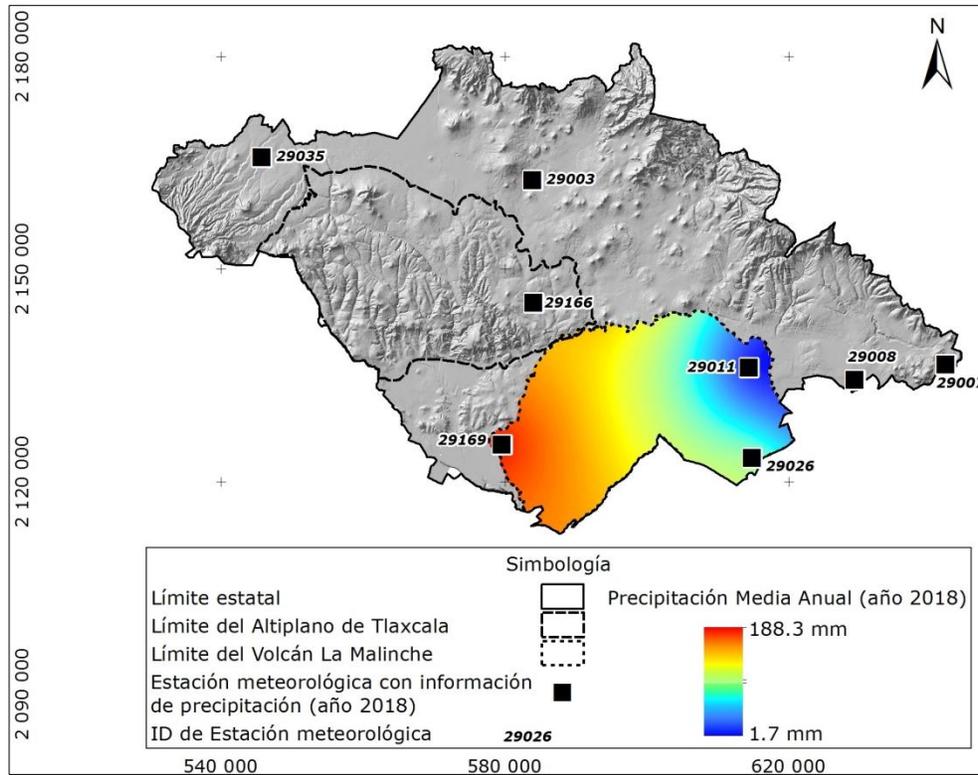


Figura 3.10. Distribución espacial de la Precipitación Promedio Mensual ponderada del año 2018 en la región Volcán La Malinche.

Con la información de la Cuadro 3.9 y Cuadro 3.10 se generó la gráfica Figura 3.11, donde se observa que históricamente disminuye la intensidad de lluvia entre los meses de junio y agosto. En la misma Figura se muestra la fecha de Siembra (en región Volcán La Malinche) y los estados vegetativos del cultivo de maíz de mayor demanda de humedad (R1 y R2) (Totis de Z. y Rebella, 1980; Loomis y Connor, 1992; Granados y Sarabia, 2013), los cuales se presentan entre 90 y 120 días después de la siembra (Ojeda, *et al.*, 2006; Yáñez, 2013; Aapresid, 2014). Se observó que la Siembra se realizó a mitad de marzo, de tal forma que los estados vegetativos R1 y R2 ocurrieron entre junio y julio, meses en que disminuyó la intensidad de lluvia, lo que posiblemente restringió el desarrollo del cultivo y su rendimiento.

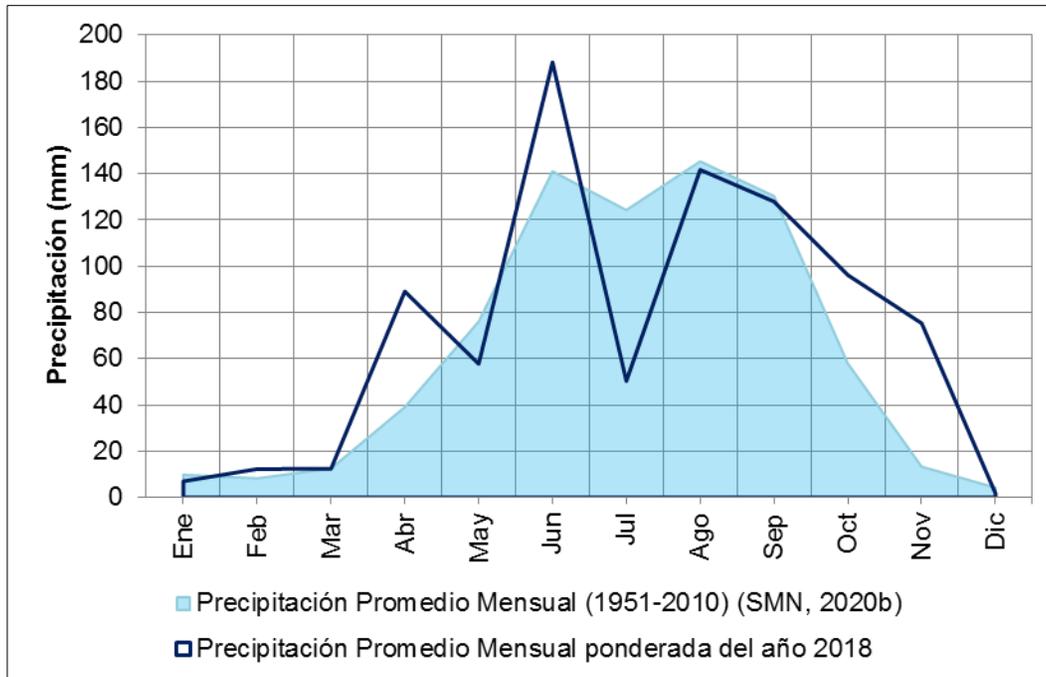


Figura 3.11. Precipitación Promedio Mensual (1951-2010 y ponderada del año 2018) de la región Volcán La Malinche.

Región Altiplano de Tlaxcala

A. Sistema de cultivo

En la Figura 3.12 se presenta la secuencia de las prácticas de cultivo y su frecuencia en que fueron aplicadas en la región Altiplano de Tlaxcala.

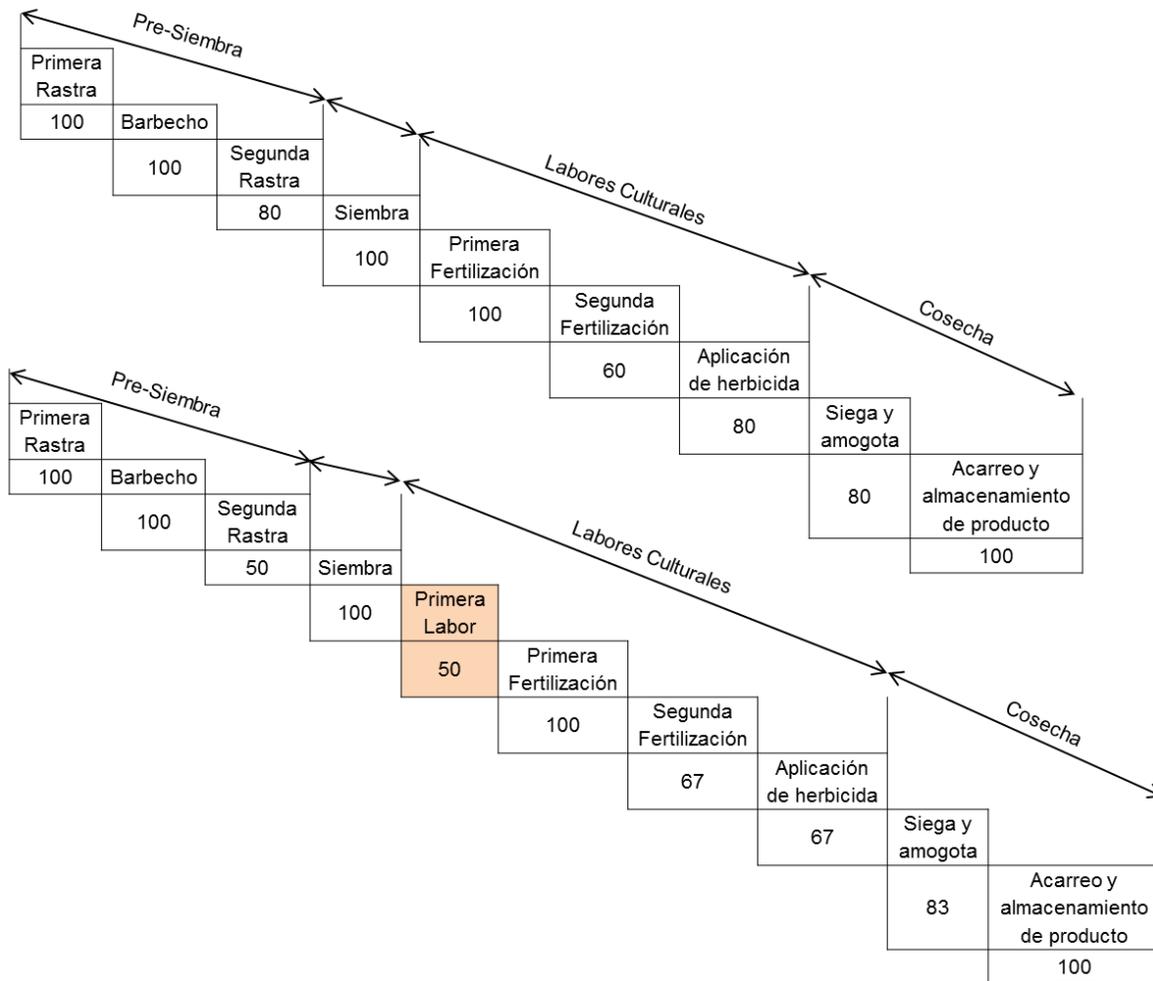


Figura 3.12. Itinerarios técnicos en parcelas con obra (arriba) y sin obra (abajo), región Altiplano de Tlaxcala.

Con base en la frecuencia de prácticas agrícolas y la información obtenida a través de las encuestas, se realizó la prueba de correlación de Pearson y de significación a los IT de parcelas CO y SO. (Figura 3.7), obteniendo un coeficiente de correlación de 0.81 ($p \leq 0.01$).

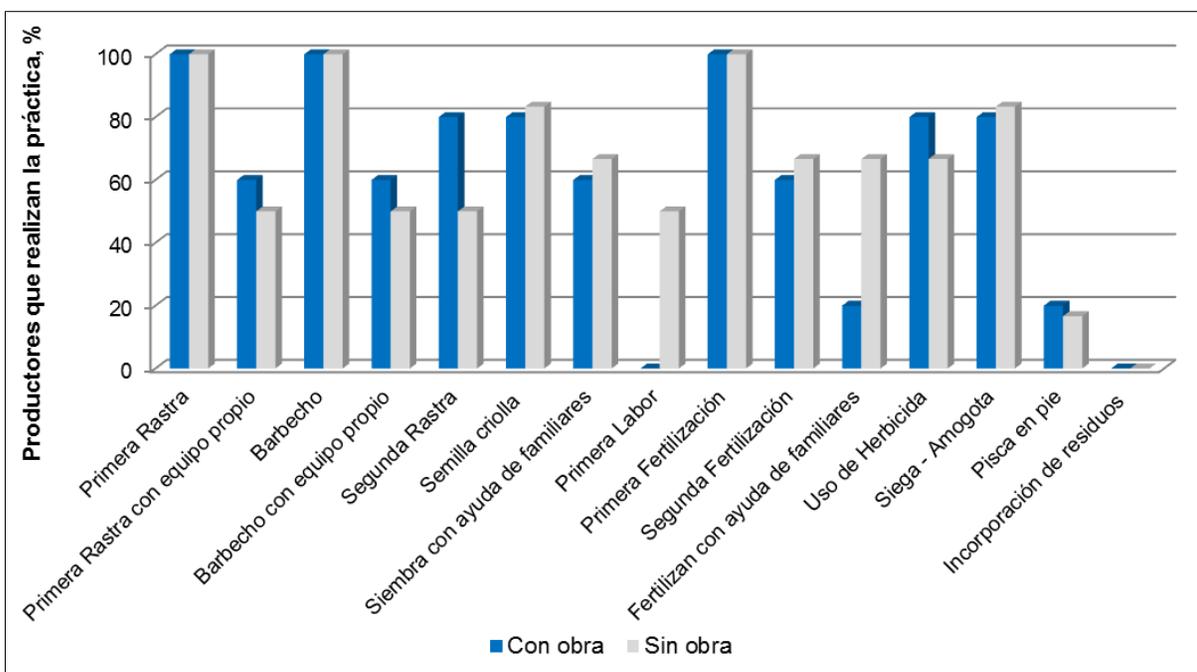


Figura 3.13. Porcentajes en que se ejecutan las prácticas agrícolas en parcelas con obra y sin obra, región Altiplano de Tlaxcala.

Pre-Siembra. A diferencia de lo que ocurre en la región Volcán La Malinche, aquí se realiza una segunda rastra, práctica local que consiste en pasar una viga o riel sobre el terreno a fin de reducir el tamaño del surco y conservar la humedad del suelo durante la siembra.

La primera rastra y barbecho se hacen con la misma frecuencia en ambos escenarios (parcelas CO y SO). La segunda rastra se realiza con mayor frecuencia en parcelas con obra. El 55% de los agricultores de la región cuenta con tractor propio para efectuar estas actividades.

Siembra. El 82% de los encuestados de esta región siembran maíz criollo, la semilla es seleccionada de la misma forma que en Volcán La Malinche.

Labores Culturales. En esta región disminuye el número de prácticas de cultivo respecto a las efectuadas en Volcán La Malinche, pasando de seis a tres en parcelas con obra, y de cinco a cuatro en parcelas sin obra.

La reducción de prácticas se relaciona a la fecha de Siembra, que en esta región se efectuó en abril, y en Volcán La Malinche, un mes antes. Retrasar la Siembra en relación a la temporada de lluvia obligó a los agricultores del Altiplano a simplificar el IT.

Fertilización. Disminuir el número de prácticas de cultivo es compensado por los agricultores fertilizando en dos ocasiones. En parcelas con obra, el 80% lo hace contratando jornales, el resto con ayuda de familiares. En parcelas sin obra la fertilización con jornales reduce a 34%. En la Cuadro 3.11 se indica la dosis y el nombre de fertilizante que aplican.

Cuadro 3.11. Características de fertilización en la región Altiplano de Tlaxcala.

	Unidad	Parcelas sin obra		Parcelas con obra	
		Fertilización		Fertilización	
		Primera	Segunda	Primera	Segunda
Fertilizante		Urea	DAP	Urea	DAP
Dosis	kg·ha⁻¹	100	100	140	110
Productores	%	83	83	80	80
Fertilizante		Triple 17		Triple 17	
Dosis	kg·ha⁻¹	230		230	
Productores	%	17		20	
Suma	%	100	83	100	80

DAP, Fosfato diamónico.

Control químico de malezas. El 80% de los agricultores de parcelas con obra usan herbicidas, en parcelas sin obra reduce a 68% (Cuadro 3.12); pero todos lo aplican con bomba, ya sea contratando jornales o con ayuda de familiares.

Cuadro 3.12. Aplicación de herbicidas en la región Altiplano de Tlaxcala.

	Unidad	Parcelas con obra			Parcelas sin obra			
		Un herbicida	Dos herbicidas		Dos herbicidas			
Herbicida		Hier	Ges	+	Peak	Ges	+	Peak
Dosis	L·ha⁻¹	1.0	1.0		0.3	1.0		0.3
Productores	%	20	20		17			
Herbicida			Ges	+	Atr*	Ges	+	Atr*
Dosis	L·ha⁻¹		0.5		1.0	0.5		1.0
Productores	%		20		17			
Herbicida			Atramix	+	Ges	Ges	+	Hier
Dosis	kg·ha⁻¹		1.0		0.2	0.7		0.6
Productores	%		20		34			
Suma	%	20	60		68			

Hier, Hierbamina; Ges, Gesaprim K90; Atr, Atrazina; *kg·ha⁻¹

Cosecha. En esta región, el 82% de los agricultores siega y amogota antes de pisca; el resto pisca en pie; el 100% pisca pagando jornales o con ayuda de familiares; y el 100% extrae el zacate de la parcela para venderlo como forraje.

Periodo de las prácticas culturales. En la Figura 3.14 se muestra el periodo en que fueron ejecutadas las prácticas de cultivo por la mayoría de los agricultores, donde se observa que:

- En parcelas con obra realizaron actividades de Pre-Siembra solo en la 1Q marzo. En parcelas sin obra las hicieron en un periodo más largo, de la 1Q marzo hasta la 1Q mayo.
- La Siembra se ejecutó en el mismo periodo (1Q abril), en parcelas CO y SO.
- Las Labores Culturales se realizaron entre la 1Q mayo y la 1Q junio en parcelas con obra. En parcelas sin obra entre la 1Q junio y la 2Q julio.
- La Cosecha se realizó en parcelas con obra entre la 2Q noviembre y la 2Q diciembre. En parcelas sin obra entre la 2Q octubre y la 1Q diciembre.

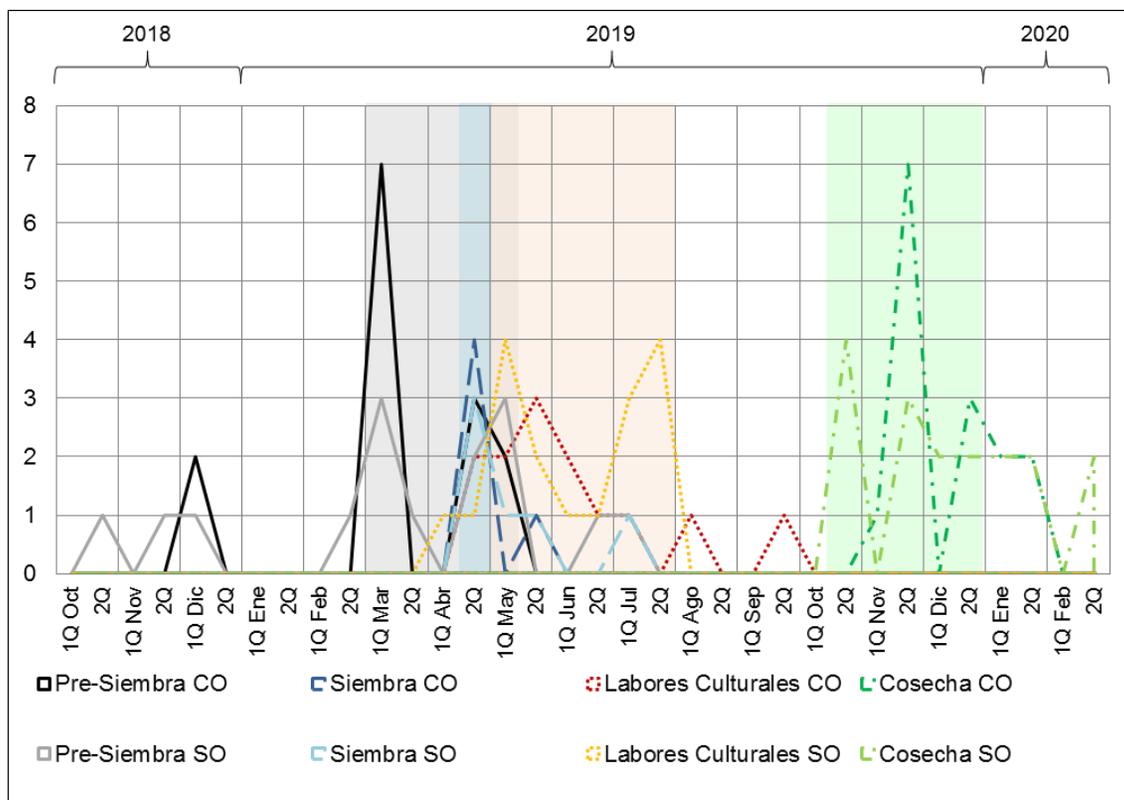


Figura 3.14. Periodo de ejecución de prácticas agrícolas en parcelas con obra [CO] y sin obra [SO], región Altiplano de Tlaxcala.

El proceso productivo de maíz en parcelas sin obra es un mes más amplio en comparación a parcelas con obra, esto se debe a la práctica de labor que se realiza únicamente en parcelas sin obra.

El IT de la región Volcán La Malinche es más amplio por el número de prácticas realizadas, pero es más corto en tiempo comparado con Altiplano de Tlaxcala, esto tiene relación con las condiciones climatológicas, ya que el periodo de lluvias en la región Volcán La Malinche es de menor intensidad al del Altiplano de Tlaxcala, lo que obliga a los agricultores a realizar sus actividades en menor tiempo.

B. Fertilidad del suelo

En la Cuadro 3.13 se muestra los valores de las determinaciones de fertilidad. Cada valor es el promedio de ocho datos, correspondientes a ocho parcelas.

Cuadro 3.13. Resultados de análisis de suelo de la región Altiplano de Tlaxcala.

Parcela	pH	CE	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	MO
		ds/m	%	ppm	---	meq/100g	---	----- ppm -----				%
Con obra	6.0	0.2	0.1	29.4	0.3	3.8	2.1	29.6	20.0	0.8	0.8	0.8
Sin obra	6.1	0.3	0.1	27.9	0.4	4.5	2.7	29.4	19.8	0.6	0.8	1.1
Clasificación*												
	Disponibilidad Baja						Moderadamente ácido					
	Disponibilidad Media						Efectos despreciables de la salinidad					
	Disponibilidad Alta						Concentración Baja					
	Disponibilidad Muy Alta											

Nota: Clasificación: ídem Cuadro 3.8.

Las parcelas CO y SO presentaron la misma clasificación de fertilidad edáfica en 11 determinaciones, sólo Cu tuvo disponibilidad Media en parcelas con obra y Baja en parcelas sin obra. Los índices de fertilidad revelan deficiencias nutrimentales en ambos escenarios, principalmente en N, Ca, Zn y Cu, por lo que es recomendable aplicar una formula rica en N (Rao, 2009).

En general se observó que los suelos de parcelas con obra tuvieron niveles de nutrientes ligeramente más altos en 14% ($p=0.638$) en relación a los suelos de parcelas sin obra. Estos resultados son similares a lo obtenido por Dano y Midmore (2004) y Hailu *et al.* (2012), quienes reportaron valores más altos ($p\leq 0.05$) en parcelas con obra.

C. Rendimiento agrícola

En la Figura 3.15 se muestran los valores de rendimiento estimado, cada valor es el promedio de un grupo de ocho parcelas con obra y ocho sin obra.

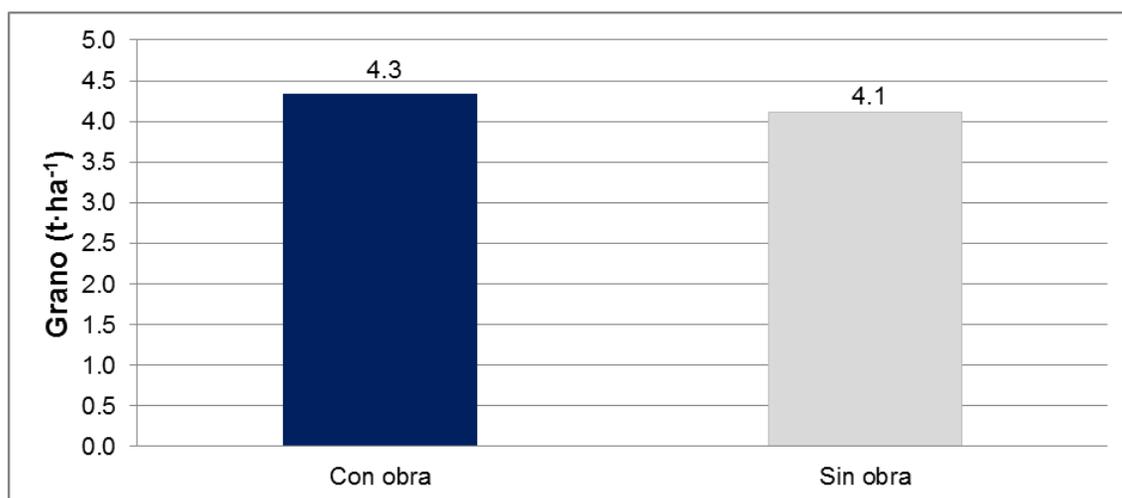


Figura 3.15. Rendimientos estimados en la región Altiplano de Tlaxcala.

El rendimiento agrícola entre parcelas CO y SO no se diferenció estadísticamente ($p=0.472$). Al parecer las dosis de fertilización mayores en parcelas con obra no son suficientes para que su rendimiento sea estadísticamente mayor.

La PH realizada entre el promedio de rendimiento de grano de maíz de 16 parcelas pareadas –de esta Región geográfica– y el promedio homólogo reportado para el mismo año por SIAP (2020) en los siete municipios donde se distribuyen dichas parcelas (Españita, Ixtacuixtla, Muñoz de Domingo Arenas, Nanacamilpa, Sanctórum, Tlaxcala y Xaltocan), indicó que no se diferencian significativamente ($p\leq 0.05$), lo que sugiere que a través del Muestreo Estratificado (con 92% de confianza) es posible obtener información representativa y extrapolable a las 15,689 ha que se cultivan con maíz en la zona estudiada, a partir de una pequeña muestra.

D. Análisis del factor clima

En la Cuadro 3.14 y Cuadro 3.15 se muestran los datos ponderados de Precipitación Promedio Mensual [PPM] ponderada del año 2018 y del periodo 1951-2010 (SMN, 2020b), respectivamente, para la región Altiplano de Tlaxcala. En la Figura 3.16 se observa la distribución espacial de la PMP ponderada del año 2018.

Cuadro 3.14. Precipitación Promedio Mensual ponderada del año 2018 en la región Altiplano de Tlaxcala.

ID de estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
	(mm)												
29010	4.9	9.8	3.2	84.5	48.7	180.1	73.3	180.6	114.4	60.9	61.7	2.2	824.3
29016	4.9	9.8	3.3	84.5	48.7	180.1	40.1	111.6	92.9	61.5	61.7	2.2	701.3
29017	4.9	9.8	3.6	84.5	48.7	180.1	39.6	108.7	92.9	63.5	61.7	2.2	700.2
29024	4.9	9.8	3.0	84.5	48.7	180.1	54.1	137.9	101.5	59.9	61.7	2.2	748.3
29030	4.9	11.5	7.4	84.5	48.7	180.1	60.6	150.6	151.1	88.5	61.7	2.2	851.8
29039	4.9	9.8	3.0	84.5	48.7	180.1	41.5	112.6	91.7	59.7	61.7	2.2	700.4
29040	4.9	9.8	6.9	84.5	48.7	180.1	59.5	141.2	137.4	85.7	61.7	2.2	822.6
29047	4.9	9.8	3.6	84.5	48.7	180.1	59.5	148.9	110.8	63.9	61.7	2.2	778.6
Promedio	4.9	10.0	4.3	84.5	48.7	180.1	53.5	136.5	111.6	68.0	61.7	2.2	765.9

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 3.15. Precipitación Promedio Mensual (1951-2010) de las estaciones meteorológicas distribuidas dentro de la región Altiplano de Tlaxcala.

ID de estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
	(mm)												
29010	5.2	8.0	16.1	43.7	70.1	128.9	135.6	133.9	106.4	59.3	16.1	5.9	729.2
29016	12.0	12.4	19.9	39.0	97.3	175.3	202.5	208.8	202.2	93.8	19.9	7.3	1090.4
29017	5.8	8.4	17.9	34.0	73.7	140.5	158.8	145.0	103.4	52.9	11.3	5.2	756.9
29024	6.2	6.7	10.9	28.2	65.9	129.5	115.6	125.4	120.5	55.7	11.9	3.6	680.1
29030	5.8	15.0	12.9	48.7	79.0	136.5	138.1	130.2	87.7	47.4	14.0	0.5	715.8
29039	7.5	5.6	11.2	37.3	77.1	133.0	140.2	127.1	116.7	68.2	1.07	6.5	747.4
29040	5.0	9.9	13.7	37.1	67.3	128.4	134.4	133.6	105.7	55.4	15.2	6.0	711.7
29047	8.7	7.3	10.4	30.8	70.8	159.6	154.5	159.9	137.8	67.3	11.1	5.0	823.2
Promedio	7.0	9.2	14.1	37.4	75.2	141.5	147.5	145.5	122.6	62.5	14.6	5.0	781.8

Fuente: elaboración propia, con Normales Climatológicas (SMN, 2020b).

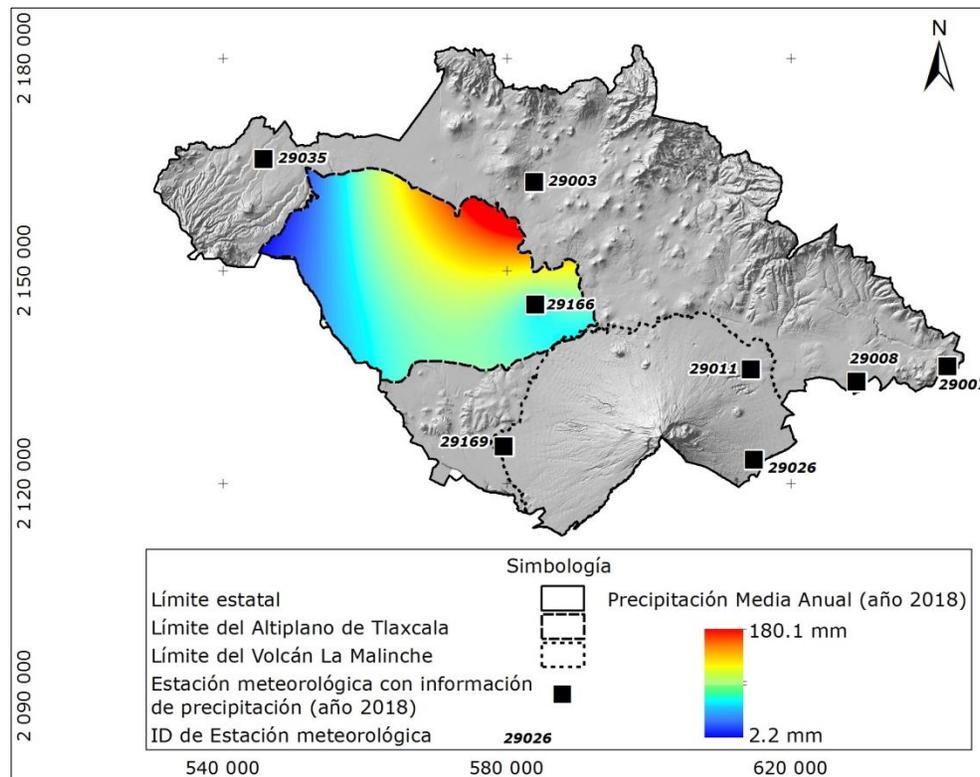


Figura 3.16. Distribución espacial de la Precipitación Promedio Mensual ponderada del año 2018 en la región Altiplano de Tlaxcala.

Con la información de la Cuadro 3.14 y 3.15 se generó la gráfica Figura 3.17, donde se observa históricamente que la intensidad de lluvia no disminuye como ocurre en Volcán La Malinche, factor que podría impactar positivamente en el rendimiento. En la misa Figura se muestra la fecha de Siembra (en región Altiplano de Tlaxcala) y los estados vegetativos del cultivo de maíz de mayor demanda de humedad (R1 y R2). Se observó que la Siembra se realizó en abril, de tal forma que los estados vegetativos R1 y R2 ocurrieron durante un periodo de estiaje, factor que pudo impactar negativamente en el rendimiento del cultivo, no obstante, el uso de semilla mejorada pudo neutralizar el efecto de la canícula, logrando mayores rendimientos en esta Región geográfica vs Volcán La Malinche.

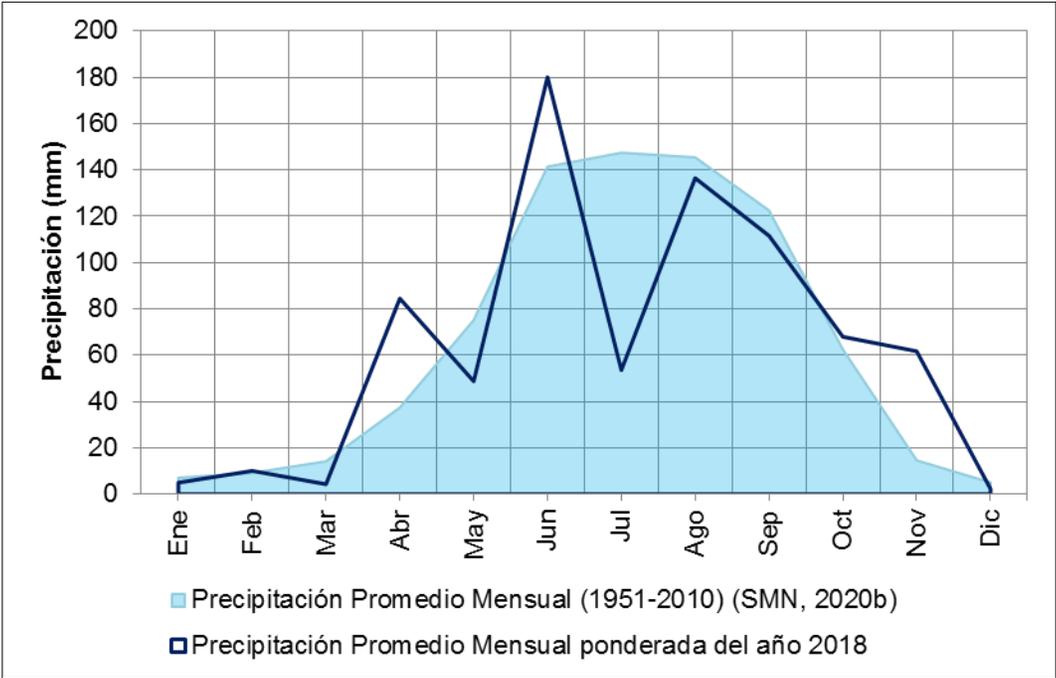


Figura 3.17. Precipitación Promedio Mensual (1951-2010 y ponderada del año 2018) de la región Altiplano de Tlaxcala.

Los valores de rendimiento de maíz e índices de fertilidad química del suelo tienden a ser más altos en parcelas con obra, sin embargo, no representan diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$). Estos resultados son similares a lo obtenido por Dano y

Midmore (2004), Jiménez (2010), Hailu *et al.* (2012), Moradi *et al.* (2015) y Zhang *et al.* (2014), quienes reportaron mejores condiciones en los suelos de parcelas con presencia de obra, aun cuando no todos sus indicadores mostraran diferencias significativas.

Este escenario no implica que las obras de conservación de suelo y agua no mejoren la capacidad productiva del recurso edáfico, ya que el rendimiento de un cultivo depende de diversos factores del clima, suelo, de la planta o del manejo, por ejemplo: temperatura ambiental, estructura del suelo, pendiente de la parcela, densidad de plantación, diversidad genética, entre otros (María, 1997; Volke, 1981; Villalpando, 1975; Nieves, 1995), los cuales no fueron considerados en la presente investigación.

La técnica de evaluación aplicada en esta investigación puede ser útil para proponer alternativas que optimicen el diseño, construcción y mantenimiento de obras de conservación; en la ejecución de acciones gubernamentales; y coadyuvar a la solución de problemas de erosión y productividad agrícola.

3.6 CONCLUSIONES

La prueba de correlación de Pearson y de significación aplicada a los IT definió un coeficiente de correlación de 0.8 ($p \leq 0.01$), lo que sugiere un alto grado de asociación entre las prácticas agrícola que se realizan en parcelas CO y SO, tanto para la región Volcán La Malinche como Altiplano de Tlaxcala.

En la región Volcán La Malinche no se encontró diferencia estadística ($p \leq 0.05$) en los índices de fertilidad química del suelo entre parcelas CO y SO, sin embargo, tienden a ser más altos en parcelas con obra, en 19% ($p=0.700$). De los 12 índices medidos, dos (Mg y ZN) tuvieron disponibilidad Alta en parcelas con obra y Media en parcelas sin obra, el resto presentó el mismo nivel de clasificación.

En la región Altiplano de Tlaxcala no se encontró diferencia estadística ($p \leq 0.05$) en los índices de fertilidad química del suelo entre parcelas CO y SO, sin embargo, tienden a ser más altos en parcelas con obra, en 14% ($p=0.638$). De los 12 índices medidos, uno (Cu) tuvo disponibilidad Media en parcelas con obra y Baja en parcelas sin obra, el resto presentó el mismo nivel de clasificación.

En las regiones Volcán La Malinche y Altiplano de Tlaxcala no se encontró diferencia estadística ($p \leq 0.05$) en rendimiento de maíz entre parcelas CO y SO; sin embargo, tienden a ser más altos en parcelas con obra, en 24% ($p=0.962$) y 6% ($p=0.472$), respectivamente.

En general, las obras de conservación, en conjunto con buenas labores culturales, tienden a mejorar la fertilidad del suelo y el rendimiento agrícola.

3.7 REFERENCIAS

- Aapresid. (2014). Estrés hídrico y térmico en el maíz. Argentina. Recuperado de: <https://www.aapresid.org.ar/blog/estres-hidrico-y-termico-en-maiz/>.
- Apollin, F., & Eberhart, C. (1999). Análisis y Diagnóstico de los Sistemas de Producción en el Medio Rural, Guía metodológica. Quito Ecuador: CARE y CESA.
- Bai, X., Tsiatis, A.A., & O'Brien, S.M. (2013). Doubly-robust estimators of treatment-specific survival distributions in observational studies with stratified sampling. *Biometrics*, 69(4),830-9. DOI: 10.1111/biom.12076.
- Chen, F.W. & Liu, C.W. (2012). Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. *Paddy Water Environ.* DOI 10.1007/s10333-012-0319-1.
- CIMMYT. (2012). Manual de determinación de rendimiento. Texcoco, Edo. de México, México: Centro Internacional de mejoramiento de Maíz y Trigo.
- CONAFOR. (2002). Resultados de la evaluación de los ejercicios 2000-2001 del PRODEFOR, estado de Tlaxcala. México: Comisión Nacional Forestal.
- CONAFOR. (2003). Evaluación PRODEPLAN 2001. México: Comisión Nacional Forestal.

- CONAFOR. (2004). Evaluación del Proyecto de Conservación y Manejo Sustentable de Recursos Forestales en México [PROCYMAF] 2003. México: Comisión Nacional Forestal.
- CONAFOR. (2005a). Evaluación del Programa de Conservación y Restauración de Ecosistemas Forestales [PROCOREF] 2004. México: Comisión Nacional Forestal.
- CONAFOR. (2005b). Evaluación del Programa de Ordenamiento y Fortalecimiento a la Autogestión Silvícola [PROFAS] 2004. México: Comisión Nacional Forestal.
- CONAFOR. (2005c). Evaluación del Programa de Pago de servicios ambientales por captura de carbono y los derivados de la biodiversidad y para fomentar el establecimiento y mejoramiento de sistemas agroforestales [PSA-CABSA], Reporte final, Ejercicio fiscal 2004. México: Comisión Nacional Forestal.
- CONAFOR. (2008a). Evaluación Externa de los Apoyos de Reforestación Ejercicio Fiscal 2007. México: Comisión Nacional Forestal.
- CONAFOR. (2008b). Evaluación Externa de los Apoyos de Reforestación Ejercicio Fiscal 2007 (Evaluación de apoyos 2004-2006). México: Comisión Nacional Forestal.
- CONAFOR. (2010). Informe de Evaluación Externa de los Apoyos de Reforestación Ejercicio Fiscal 2009. México: Comisión Nacional Forestal.
- CP. (2004). Evaluación del Programa de Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos [PSAH]. Texcoco, México: Colegio de Postgraduados.
- CP. (2008). Evaluación Externa de Obras de Restauración de Suelos Forestales, Ejercicio Fiscal 2007 (Evaluación de apoyos 2004-2006). Texcoco, México: Colegio de Postgraduados.
- Cotler, A.H., Sotelo, E., Domínguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S., & Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, 83: 5-71.
- Cotler, A.H., Cram, H.S., Martínez, T.S., & Bunge, V. (2015). Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trinchera. *Investigaciones Geográficas*, 88, 6-18. DOI: 10.14350/ig.47378.
- Dano, A.M. & Midmore, D.J. (2004). Evaluation of soil and water conservation technologies in vegetable based upland production system of manupali watershed, Southern Philippines. *Conserving Soil and Water for Society: Sharing Solutions* 213:1-5.
- De Graaff, J., Kessler A., & Olsen P. (2010). Farm-level adoption of soil and water conservation measures and policy implications in Europe. *Land Use Policy*, 27:1-3.

- Fontaine, R.E. (1989). *Evaluación Social de Proyectos* (12^a ed.). Santiago. Chile: Alfaomega.
- Flores, S.D. (2000). *Biodiversidad, gestión de sistemas de cultivo de maíz y patrimonio: estudio de caso cuenca del Río Texcoco* (tesis de maestría). Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México.
- Flores, S.D., Kleine, J.K., Navarro, G.H., Lantinga, E.A., Groot, J.C.J., Kropff, M.J., & Rossing, W.A.H. (2011). Diagnosis for ecological intensification of maize-based smallholder farming systems in the Costa Chica, Mexico. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 91:185–205. DOI: 10.1007/s10705-011-9455-z.
- Granados, R.R. & Sarabia, R.A.A. (2013). Cambio climático y efectos en la fenología del maíz en el DDR-Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (4)3,435-446.
- Guttman, B.N. (1994). On the sensitivity of sample L moments to sample size. *Journal of Climate*, 7:1026–1029.
- Hailu, W., Moges, A., & Yimer F. (2012). The Effects of "Fanya juu" Soil Conservation Structure on Selected Soil Physical & Chemical Properties: the Case of Goromti Watershed, Western Ethiopia. *Resources and Environment*, 2(4), 132-140. DOI: 10.5923/j.re.20120204.02.
- Hernández, G.A., Valadez, M., & Carballo, A. (1993). *Tecnología tradicional para obtener semilla de maíz en los valles centrales de Oaxaca*. Mexico: CEICADAR.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, P.J., Jones, P.G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol*, 25, 1965–1978.
- INAFED. (2010). *Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México*. México: Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Recuperado de: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/index.html>.
- INEGI. (2017). *Anuario Estadístico y Geográfico de Tlaxcala 2017*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Jenny, H. (1941). *Factors of soil formation*. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, N.J.
- Jiménez, B.C. (2010). *Evaluación de obras de conservación de suelos en el Distrito de Coixtlahuaca (Oaxaca, México) y bases para actuaciones futuras* (tesis de licenciatura). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Jiménez, V.J. (2001). *Métodos estadísticos*. En: Lacasa, A., Humet, C., & Cot, R. (edt.). *Errores de Medicación Prevención, diagnóstico y tratamiento* (125-142). Barcelona, España. Ed. EASO.

- Johansson, B., & Chen, D. (2003). The influence of wind and topography on precipitation distribution in Sweden: statistical analysis and modelling. *Int. J. Climatol*, 23, 1523–1535.
- Lafitte, H.R., & Edmeades, G.O. (1994). Improvement for tolerance to low soil nitrogen in tropical maize II. Grain yield, biomass production, and N accumulation. *Field Crops Research*, 39,15-25. DOI:org/10.1016/0378-4290(94)90067-1.
- Laird, R.J. (1965). Principios de la metodología para estudiar las necesidades de los fertilizantes. Seminario presentado el 24 de Noviembre. Sin Publicar. México: Escuela Nacional de Agricultura.
- Li, J., & Heap, A.D. (2014). Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environ. Modell. Softw*, 53, 173–189.
- Loomis, R.S. & Connor, D.J. (1992). *Crop Ecology: Productivity and Management in Agricultural Systems*. New York, United States of America: Oxford University Press.
- María R., A. (1997). Potencial productivo de maíz en la región oriente del estado de Tlaxcala (tesis de maestría). Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México.
- Moradi, A., Teh Boon, S.C., Joo, G.K., Mohd, H.A.H., & Fauziah, I.C. (2015). Effect of four soil and water conservation practices on soil physical processes in a non-terraced oil palm plantation. *Soil and Tillage Research*, 145, 62–71. DOI: 10.1016/j.still.2014.08.005.
- Nieves, F.J.L. (1995). Modelos de simulación para la estimación del rendimiento potencial del cultivo de maíz en el ejido de Atenco, México (tesis de maestría). Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.
- Navarro, G.H., Pérez, O.A., & Flores S.D. (2004). Productividad del tepetate con sistemas rotacionales. *Terra Latinoamericana*, 22(1), 71-79.
- Ojeda, B.W., Sifuentes, I.E., & Unland, W.H. (2006). Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*, 40: 13-25.
- OMM. (2012). Índice normalizado de precipitación, Guía de usuario. Suiza: Organización Meteorológica Mundial.
- Analysis, Part 1.2nd Ed. *Agronomy* 9(1), 33-51.
- SAGARPA. (2000). Metodología de costos de producción para cultivos cíclicos y perennes. México: Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- SAGARPA. (2001). El maíz para grano bajo riego en la zona media de San Luis Potosí. México: Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

- SAGARPA. (2015). Compendio de Indicadores 2014 Componente Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua [COUSSA] Tlaxcala. México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- SAGARPA. (2016). Informe de Evaluación 2014-2015, Componente Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua [COUSSA] Tlaxcala. México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- SAGARPA. (2017a). Compendio de Indicadores 2016, Programa de Productividad Rural, Componente Infraestructura Productiva Para el Aprovechamiento Sustentable de Suelo y Agua [IPASSA] Tlaxcala. México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- SAGARPA. (2017b). Compendio de Indicadores 2017, Programa de Apoyo a Pequeños Productores, Infraestructura Productiva Para el Aprovechamiento Sustentable de Suelo y Agua Tlaxcala. México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- SEMARNAT. (2002). NOM-021-SEMARNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SMN. (2020a). Normales Climatológicas por estado. México: Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>.
- SMN. (2020b). Normales Climatológicas por estado. México: Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=tlax>.
- Totis de Z., L.E. & Rebella, C.M. (octubre, 1980). Necesidades de agua de un cultivo de maíz en la región de Pergamino. En: Actas del III Congreso Nacional de Maíz. Pergamino.
- Turrent, F.A., Laird, R.J., Cortés, F.J.I., & Volke, H.V. (2005). Un reencuentro con la productividad de agrosistemas: I. fundamentos y herramientas. *Agrociencia*, 39: 29-39.
- UACH. (2007). Evaluación de los Apoyos de Reforestación, Obras y Prácticas de Conservación de Suelos y Sanidad Forestal. Texcoco, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- UACH. (2009). Informe de Evaluación Externa de los Apoyos de Restauración de Suelos Forestales, Ejercicio Fiscal 2009. Texcoco, México: Universidad Autónoma Chapingo.

- UAM. (2003). Evaluación externa del Programa Nacional de Reforestación (PRONARE) en el estado de Tlaxcala. México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Villalpando, I.J.F. (1975). Desarrollo de un método para obtener ecuaciones empíricas generalizadas del rendimiento en una región agrícola, para uso en diagnóstico (tesis de maestría). Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.
- Volke, H.V. (1981). Estimación de funciones de producción mediante regresión en experimentos con fertilizantes y densidad de plantas, con fines de determinación de óptimos económicos. Texcoco, México: Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo.
- Yáñez, G.C., Zambrano, J.L., Marlon, C., & Heredia, J. (2013). Guía de Producción de maíz para pequeños agricultores y agricultoras. Quito, Ecuador: INIAP.
- Zhang, F., Xing, Z., Rees, H.W., & Dong, Y. (2014). Assessment of effects of two runoff control engineering practices on soil water and plant growth for afforestation in a semi-arid area after 10 years. *Ecological Engineering*, 64: 430–442. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.12.024.

CONCLUSIONES GENERALES

Conclusiones

- El análisis de imágenes satelitales y uso de SIG permitió identificar 2,469 polígonos, que en conjunto suman 1,9334 km² (48% del territorio estatal), superficie clasificada en cuatro tipos de obra: 1) conservación forestal con 226 km²; 2) agricultura con obra siguiendo curvas a nivel con 1,127 km²; 3) parcela perpendicular a la pendiente con 416 km²; y 4) área urbana con parcelamientos con 164 km².
- El sistema de Muestreo Estratificado generó un tamaño de muestra de 16 polígonos con obra, número menor al obtenido con los muestreos Simple Aleatorio y Proporciones con Varianza Máxima: 129 y 191 polígonos, respectivamente. El Muestreo Estratificado tiene el potencial de disminuir los costos de evaluación al considerar un número menor de muestras, esto sin reducir la confiabilidad estadística que se requiere.
- En las región Volcán La Malinche no se encontró diferencia estadística ($p \leq 0.05$) en los índices de fertilidad química del suelo entre parcelas CO y SO, sin embargo, tienden a ser más altos en parcelas con obra, en 19% ($p=0.700$); de los 12 índices medidos, dos (Mg y ZN) tuvieron disponibilidad Alta en parcelas con obra y Media en parcelas sin obra, el resto presentó el mismo nivel de clasificación o disponibilidad, lo mismo se observó en la región Altiplano de Tlaxcala, donde los índices de fertilidad son ligeramente más altos en parcelas con obra, en 14% ($p=0.638$); Cu tuvo disponibilidad Media en parcelas con obra y Baja en parcelas sin obra, el resto mantuvo el mismo nivel. Respecto al rendimiento de maíz, en ambas Regiones geográficas tampoco se encontró diferencia estadística ($p \leq 0.05$) entre parcelas CO y SO, sin embargo, tienden a ser más altos en parcelas con obra, en 24% ($p=0.962$) para la región Volcán La Malinche y 6% ($p=0.472$) para la región Altiplano de Tlaxcala. Estos escenarios no implican que las

obras de conservación no mejoren la capacidad productiva del recurso edáfico, ya que el rendimiento de un cultivo depende de diversos factores del clima, suelo, de la planta o del manejo (María, 1997; Volke, 1981; Villalpando, 1975; Nieves, 1995) que no fueron considerados en la presente investigación.

- Existe evidencia lógica que sugiere que las obras de conservación de suelo y agua, en conjunto con buenas labores culturales, mejoran la fertilidad del suelo e incrementa el rendimiento agrícola.

Recomendaciones

- Algunos autores (Domenech, 1999; Kelsey, 1986) refieren que trabajar empíricamente con muestras pequeñas posiblemente no represente a la población total adecuadamente; por lo que es recomendable aplicar otros sistemas de muestreo al inventario de obras de Tlaxcala para comparar resultados de caracterización en gabinete y campo.
- El muestreo Simple Aleatorio que se usó para evaluar el PRONARE (CONAFOR, 2010) fue aplicado como un sistema de Muestreo Estratificado, ya que el tamaño de las muestras fue calculado proporcionalmente para cada subcategoría; sin embargo, lo recomendable es aplicar el método con un nivel de confiabilidad de al menos 95%, lo que implica un ligero aumento de muestras, respecto al número usado en la presente investigación.
- La selección de semilla debe realizarse antes de segar, eligiéndose plantas con competencia completa, de talla intermedia, con ≥ 2 mazorcas; seleccionar mazorcas ubicadas en la parte media de la planta, con la punta bien cerrada, consistente y volteada hacia abajo (FAO, SA).
- Con base en los resultados de análisis de laboratorio se recomienda aplicar una fórmula rica en nitrógeno [N], ya que este macronutriente tiene una

disponibilidad baja en los 32 sitios muestreados. El N en la planta es quizá el nutriente más importante en los agroecosistemas, dada su participación en múltiples reacciones bioquímicas implicadas fisiológicamente en el crecimiento, desarrollo y producción de cultivos (Rao, 2009). En el cultivo de maíz se ha demostrado un efecto proporcional de los rendimientos conforme se incrementan los niveles de fertilización (Alvarez *et al.*, 2003).

- Se recomienda incorporar los residuos de cosecha a terreno agrícola, ya que la MO es una fuente de nutrientes para las plantas y de energía para los microorganismos del suelo (Lal, 2004), también representa un factor determinante de la calidad del recurso edáfico (Arias *et al.*, 2005), y coadyuva en la estabilización del suelo frente al proceso de erosión (Houghton *et al.*, 1999).