



Universidad Autónoma de Tlaxcala

Posgrado en Ciencias Biológicas

*Distribución espacial del carbono orgánico del suelo
en el ecosistema de alta montaña
La Malinche*

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
DOCTOR EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

P r e s e n t a

FUSARO CARMINE

Directora

Dra. YENDI EBENEZER NAVARRO NOYA

Tlaxcala, Tlax.

Noviembre, 2019



Universidad Autónoma de Tlaxcala

Posgrado en Ciencias Biológicas

*Distribución espacial del carbono orgánico del suelo
en el ecosistema de alta montaña
La Malinche*

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
DOCTOR EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

P r e s e n t a

FUSARO CARMINE

Directora

Dra. YENDI EBENEZER NAVARRO NOYA

Tutores

Dr. ARTURO ESTRADA-TORRES

Dr. LUC DENDOOVEN

Tlaxcala, Tlax.

Noviembre, 2019



Universidad
Autónoma de
Tlaxcala

Posgrado en Ciencias Biológicas
Coordinación de la División de Ciencias Biológicas
Secretaría de Investigación Científica y Posgrado



COORDINACIÓN DOCTORADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA
P R E S E N T E

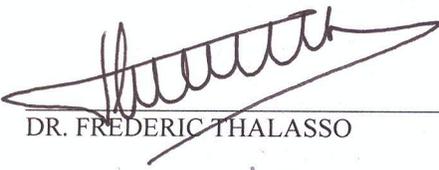
Los abajo firmantes, miembros del jurado evaluador del proyecto de tesis que **Carminé Fusaro** realiza para la obtención del grado de **Doctor en Ciencias Biológicas**, expresamos que, habiendo revisado la versión final del documento de tesis, damos la aprobación para que ésta sea impresa y defendida en el examen correspondiente. El título que llevará es **“Distribución espacial del carbono orgánico del suelo en el ecosistema de alta montaña La Malinche”**.

Sin otro particular, aprovechamos para enviarle un cordial saludo.

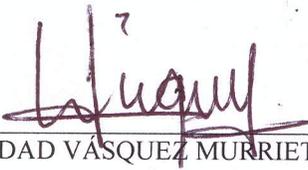
A T E N T A M E N T E
TLAXCALA, TLAX., OCTUBRE 18 DE 2019


DR. LUC BENDOOVEN

A Estrada
DR. ARTURO ESTRADA TORRES


DR. FREDERIC THALASSO


DRA. ITZEL ARIAS DEL RAZO


DRA. SOLEDAD VÁSQUEZ MURRIETA



Sistema Institucional de Gestión de la Calidad Certificado bajo la Norma:
ISO 9001:2015-NMX-CC-9001-IMNC-2015



Este proyecto de investigación fue realizado bajo la dirección de la Dra. Yendi E. Navarro Noya y la asesoría de mi comité tutorial en el Centro Tlaxcala de Biología de la Conducta (CTBC) de la Universidad Autónoma de Tlaxcala (UAT), y en los laboratorios del departamento de Biotecnología del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV, México).

El presente proyecto doctoral se ha a llevado cabo con el apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), No. de Apoyo 426973 – No. de Convocatoria 291025.

AGRADECIMIENTOS

Esta aventura de Doctorado en México ha sido para mí una experiencia extremadamente importante y formativa tanto profesionalmente como humanamente, con estas pocas líneas quisiera agradecer todas la persona que me acompañaron en este camino y que contribuyeron hacer mi estancia en América especial y muy satisfactoria.

Gracias a *Dios* y la *SS. María del Rosario y Guadalupe* por protegerme y acompañarme en todos los días de mi vida.

Agradezco al Posgrado del Centro Tlaxcala de Biología de la Conducta (CTBC) de la Universidad Autónoma de Tlaxcala (UAT) por apoyarme y guiarme en este proyecto de doctorado.

La Dra. Yendi E. Navarro Noya, el Dr. Arturo Estrada Torres y el Dr. Luc Dendooven han sido constantes fuentes de inspiración; gracias a su apoyo, sus ideas novedosas, consejos prácticos se ha realizado un proyecto de tesis de alta calidad además de redactar un artículo de impacto científico.

Agradezco todas las personas del CTBC de la UAT que han sido siempre muy cariñosos y respetuosos hacia mí brindándome consejos útiles y apoyándome en las actividades de muestreo y de investigación. Las secretarias Rebeca Sánchez López y Socorro Romero Potiño siempre me ayudaron en mis vicisitudes técnicas y administrativas con consejos útiles y documentos.

La Dra. Yohanna del Carmen Sarria Guzmán, el Dr. Yosef Chávez Romero, el M. Edgar Villeda y la M. Ligia Catallina Muñoz Arenas son amigos confiables, profesionistas de grande espesor técnico y humano, fueron indispensables para la organización de los muestreos, la realización de los experimentos de laboratorio y la implementación de los diferentes algoritmos.

Quiero agradecer a todos los amigos y los compañeros de laboratorio que de una u otra forma estuvieron ahí para darme fuerza y empuje con consejos, ideas y sugerencias.

Quiero agradecer con todo el *Corazón* a México, País que me acogió como uno más de sus hijos y me ha brindado grandes oportunidades para mi desarrollo personal y profesional. A los mexicanos personas muy nobles y altruistas. *Viva México*.

Gracias a mi familia, a mi negrita colombiana y a mis amigos italianos que a pensar de la grande distancia que nos separa siempre estuvieron presentes dándome fortaleza en los tiempos de dificultad y nostalgia.

Un sentido gracias a William Rossano, mi amigo más brillante, soñar contigo me da energía y fuerza en mi trabajo, tu espíritu siempre vivirá en mí.

Todas las personas mencionadas en estas páginas han desempeñado un papel clave en el desarrollo de mi proyecto doctoral y en la redacción de la tesis, pero quisiera señalar que cualquier error o inexactitud sólo es atribuible a mí mismo.

What a wonderful World!

(Bob Thiele)

*A la SS. María del Rosario
y Guadalupe*

RESUMEN

Los suelos de los ecosistemas desempeñan un papel clave en la regulación del clima y representan una importante reserva de carbono (C), almacenando más C que la atmósfera y la vegetación terrestre en conjunto. Las acciones humanas como deforestación, turismo, urbanización representan las causas principales de degradación química, física y biológica de los suelos. Como consecuencia hay una disminución en la productividad y cambios en la funciones ecológicas del suelo además de una significativa pérdida de las reservas de carbono orgánico del suelo (SOC_{STKs}) a escala local, especialmente en las regiones montañosas caracterizadas por bosques templados.

Este proyecto de investigación tiene como objetivo principal realizar un análisis de la variabilidad espacial de los SOC_{STKs} del suelo superficial en el ecosistema de alta montaña del Parque Nacional La Malinche (PNLM) a través de métodos de interpolación basados en GIS y relacionar los resultados, en particular, con el uso del suelo. Para ello, se recolectó suelo de diferentes paisajes del PNLM, es decir, bosques de pinos, abetos, robles y bosques mixtos, pastizales naturales, páramos de altura y suelos agrícolas, y se determinó el carbono orgánico del suelo (SOC). Se implementaron tres técnicas de interpolación determinísticas: distancia inversa ponderada (IDW), interpolación polinómica local (LPI), función de base radial (BRF) y tres técnicas geoestadísticas: kriging ordinario (OK), kriging bayesiano empírico (EBK) y cokriging (CK) para crear mapas temáticos de los SOC_{STKs} del suelo superficial del PNLM.

Todos los métodos de interpolación describieron satisfactoriamente la distribución espacial de los SOC_{STKs} en el PNLM. La reserva (stock) total de carbono orgánico del suelo ($T.Stock_{SOC}$) (horizonte O + horizonte A) del PNLM se estimó en 2.44 Tg. El mayor aporte fue del paisaje forestal con 2.09 Tg C (85.31% del $T.Stock_{SOC}$), así divididos 0.83 Tg C en el horizonte O y 1.26 Tg C en el horizonte A. Los suelos agrícolas contribuyeron con 0.28 Tg C (11.40% del $T.Stock_{SOC}$), 0.05 Tg C en el horizonte O y 0.23 Tg C en el horizonte A. Finalmente, el aporte de las áreas de pastizal fue de solo 0.07 Tg C, equivalente al 3.31% del $T.Stock_{SOC}$ en el PNLM.

El $T.Stock_{SOC}$ en suelo superficial del PNLM estimado para el año 1938 fue de 4.98 Tg y desde entonces se ha reducido a la mitad. Si esta tendencia continuara constante

y todo el bosque restante se convertiría en suelos agrícolas el T.StockSOC caería inevitablemente hasta a 0.52 Tg. El cambio en el uso del suelo (conversión de los bosques en suelos agrícolas) y la tala clandestina han sido los factores principales de la distribución espacial de los SOC_{STKs} en el suelo superficial del PNLM y causas de su caída.

La cartografía temática producida en esta tesis doctoral puede representar una base cartográfica adecuada para diseñar y desarrollar proyectos de restauración y monitoreo de esta área, con el objetivo de aumentar o por lo menos preservar los SOC_{STKs} en el PNLM. Este estudio también puede utilizarse como modelo de referencia para el análisis de la variabilidad espacial de los SOC_{STKs} en los bosques templados que caracterizan el área de la Faja Neovolcánica Transmexicana.

ÍNDICE

	Pag.
1. INTRODUCCIÓN	3
2. ANTECEDENTES	6
3. JUSTIFICACIÓN.....	11
4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	12
5. OBJETIVOS.....	12
5.1. Objetivo General.....	12
5.2. Objetivos Específicos	12
6. METODOLOGÍA	13
6.1. Área de Estudio.....	13
6.2. Muestreo y Análisis de Laboratorio	15
6.3. Métodos de Interpolación	16
6.3.1. Distancia Inversa Ponderada (IDW).....	16
6.3.2. Función de Base Radial (RBF).....	17
6.3.3. Interpolación Polinómica Local (LPI).....	17
6.3.4. Kriging Ordinario (OK).....	18
6.3.5. Kriging Bayesiano Empírico (EBK).....	19
6.3.6. Cokriging (CK).....	19
6.4. Validación Cruzada	20
6.5. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	20
6.6. Estimación de la Reserva de Carbono Orgánico del Suelo (T.Stock _{SOC}).....	21
7. RESULTADOS	23
7.1. Variabilidad del Carbono Orgánico del Suelo (SOC)	23
7.2. Variabilidad del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....	26
7.3. Reserva de Carbono Orgánico del Suelo (T.Stock _{SOC}).....	28
7.4. Efectividad de los Métodos de Interpolación	29
8. DISCUSIÓN.....	33

8.1. Patrones de Distribución de las Reservas Ecosistémicas de Carbono Orgánico del Suelo (SOC _{STKs}).....	33
8.2. Desempeño de los Métodos de Interpolación.....	36
8.3. Escenarios Hipotéticos.....	37
9. CONCLUSIONES	39
10. PERSPECTIVAS	40
11. REFERENCIAS	41
12. ACRÓNIMOS y ABREVIATURAS	51

ÍNDICE de las T A B L A S

Tabla 1. Estudios previos sobre el mapeo de los almacenes de carbono.....	8
Tabla 2. Resumen estadístico del carbono orgánico del suelo (SOC) en el horizonte A del Parque Nacional La Malinche (PNLM).....	24
Tabla 3. Parámetros de validación cruzada y eficiencia de los métodos interpolación.....	31

ÍNDICE de las F I G U R A S

Figura 1. Área de Estudio: Parque Nacional La Montaña Malinche (PNLM).....	15
Figura 2. A. Diagrama de dispersión y B. Boxplot - Contenido de carbono orgánico del suelo (SOC) del horizonte A y el uso del suelo - en el Parque Nacional La Malinche (PNLM).....	26
Figura 3. Distribución espacial del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el Parque Nacional La Malinche (PNLM).....	28
Figura 4. Diagrama de dispersión: correlación entre el contenido de carbono orgánico del suelo (SOC) del horizonte A y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el Parque Nacional La Malinche (PNLM).....	29

Figura 5. Distribución espacial de los almacenes carbono orgánico del suelo (SOC_{STKs}) en el suelo superficial del Parque Nacional La Malinche (PNLM) – métodos determinísticos.....	32
Figura 6. Distribución espacial de los almacenes carbono orgánico del suelo (SOC_{STKs}) en el suelo superficial del Parque Nacional La Malinche (PNLM) – métodos geoestadísticos.....	33

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es sin duda, uno de los retos ambientales más severos del siglo XXI (Roose y cols. 2005, Gerber y cols. 2013, Feulner 2017). Actividades humanas como los procesos industriales, la producción de electricidad (centrales eléctricas y termoeléctricas), la quema de combustibles fósiles, la producción agropecuaria, el cambio de uso del suelo (deforestación y ganadería) producen un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG), como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), a la atmósfera (Stocker 2014). Esta enorme presión antropogénica constituye un importante factor causante del cambio climático, pues los GHC retienen el calor en la atmósfera terrestre y provocan el calentamiento global (Roose y cols. 2005, Steinfeld y cols. 2006).

El aumento de la temperatura media mundial se asocia con cambios generalizados en los patrones climáticos. Como consecuencia aumenta el alcance y la frecuencia de los eventos naturales extremos (Vargas 2008). Los eventos climáticos extremos tienen el potencial de causar desastres naturales y graves daños a las personas, a la infraestructura y a los ecosistemas e implican impactos sociales, económicos y ambientales (Gobiet y cols. 2014). En consecuencia, problemas sociales y económicos, como la seguridad alimentaria, la migración y la inestabilidad política, también están estrechamente relacionados con el cambio climático y la degradación del suelo (FAO 2008, Dodo 2014).

Las concentraciones atmosféricas de CO₂ pueden disminuirse, ya sea reduciendo las emisiones derivadas de las actividades humanas o con el secuestro de carbono, es decir, mediante la extracción de CO₂ de la atmósfera y su almacenamiento seguro en los ecosistemas terrestres (suelo - vegetación) (Roose y cols. 2005, Lal 2008). Es importante destacar que el suelo es un depósito considerable de carbono (C), conteniendo más C que la atmósfera y la vegetación terrestre en conjunto (Lal 2008). Se estima que la reserva de carbono orgánico del suelo (SOC) es aproximadamente de 1500 Pg en el primer metro de suelo, aunque su distribución es espacial y temporalmente variable (FAO 2018).

La tasa de retención del SOC depende de múltiples parámetros como la textura y estructura del suelo, las precipitaciones, la temperatura ambiental, las técnicas de cultivo y la gestión del suelo (Lal 2004, Roose y cols. 2005). Sin embargo, las actividades humanas como deforestación, turismo, urbanización, entre otras, representan las causas principales de degradación química, física y biológica de los suelos, como consecuencia hay una disminución en la productividad y cambios en las funciones ecológicas del suelo y una

pérdida significativa de las reservas de SOC (SOC_{STKs}) a escala local, especialmente en los bosques templados en las regiones montañosas (Segnini y cols. 2011).

Los bosques templados figuran entre los ecosistemas más productivos de la Tierra y ocupan actualmente el 16% del territorio mexicano, se distribuyen en mayor grado en altitudes entre 2000 y 3400 msnm y son característicos de la región del Eje Neovolcánico Transmexicano (CONANP <http://www.sig.conanp.gob.mx>). Crecen sobre suelos con textura muy variada desde limosos a arenosos, moderadamente ácidos, con abundante materia orgánica y hojarasca. Los bosques templados de México se enfrentan a grandes amenazas como la tala de grandes extensiones para el desarrollo de la agricultura, la industria maderera y el pastoreo extensivo. Todo esto conduce a una disminución de los servicios ambientales del ecosistema y a una reducción considerable de los SOC_{STKs} (Arriaga-Cabrera y cols. 2009).

La restauración ecológica activa y la regeneración forestal de los bosques templados resultan ser estrategias sostenibles y efectivas para aumentar los SOC_{STKs} , además, de recuperar la funcionalidad y dinámica de los ecosistemas de montaña (Lal 2004, Shah y Venkatramanan 2009). En los suelos agrícolas, la agricultura de conservación, que comprende una serie de técnicas como labranza cero, la retención de cubierta vegetal y la aplicación de insumos externos de C (estiércol y composta), contribuye significativamente a la acumulación del SOC (Shah y Venkatramanan 2009).

El SOC es un indicador crítico de la calidad del suelo y la generación de mapas temáticos pueden mejorar nuestra comprensión de su distribución espacial y producir efectos positivos sobre el modelado ecológico, la predicción ambiental, el rendimiento de los cultivos y el manejo de los recursos naturales (Wei y cols. 2008, Liu y cols. 2014, Zhang y cols. 2015, Jeelani y cols. 2017). Sin embargo, las actividades de protección y de monitoreo de los SOC_{STKs} a escala local todavía se enfrentan a desafíos complicados que obstaculizan el diseño e implementación de políticas e intervenciones efectivas y adaptadas a regiones específicas (Zhang y cols. 2015).

El sistema de información geográfica (GIS) es un sistema computarizado de gestión que permite capturar, almacenar, recuperar, manipular, analizar y visualizar datos espaciales. Mediante GIS se pueden mostrar diferentes tipos de datos y atributos en un solo mapa. Las ventajas consisten en una sencilla interpretación de los datos, un análisis eficiente y la comprensión efectiva tanto de los patrones ambientales determinantes como

de las relaciones ecosistémicas inherentes (ESRI <http://www.esri.com/environment>, Chang 2015). Hoy en día, los modelos estadísticos geográficos se utilizan comúnmente para describir las propiedades del suelo y redactar mapas temáticos. La precisión y el grado de detalle de los mapas temáticos están fuertemente influenciados por las características geográficas de la región, el número y la densidad de los sitios de muestreo. En la mayoría de los casos también la georreferenciación de variables secundarias juegan un papel importante como la temperatura media anual, la precipitación media anual, la altitud, la estructura y el tipo de vegetación y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Bhunja y cols. 2019).

2. ANTECEDENTES

El GIS ha resultado muy útil en diversas actividades, por ejemplo, para describir la variabilidad espacial de los SOC_{STKs} , optimizar los resultados de la restauración ecológica del suelo, promover los proyectos de regeneración de los bosques y la agricultura de precisión (Clay y Shanahan 2011, Zhang y cols. 2012, Bhunia y cols. 2018). Entre la amplia gama de opciones para crear mapas temáticos a través del GIS se destacan los algoritmos de interpolación determinísticos y geoestadísticos (Scull y cols. 2003). Las técnicas determinísticas crean superficies de interpolación en función del grado de similitud y homogeneidad de la muestras, mientras que los métodos geoestadísticos crean superficies con base en las propiedad estadísticas del conjunto de muestras.

Diferentes algoritmos determinísticos y geoestadísticos con base en GIS han sido implementados para describir la distribución espacial del carbono orgánico del suelo (SOC) y de las reservas de SOC (SOC_{STKs}) en diferentes tipos de ecosistemas. El método de interpolación kriging ordinario (OK) fue exitosamente implementado para describir la distribución espacial del SOC en una zona seleccionada de Chongwe-Rufunsa (Zambia), los mapas producidos pueden usarse como guías para varios usos ecológicos y agrícolas, como alcanzar un mayor rendimiento de los cultivos locales (Chabala y cols. 2017). La técnica de interpolación determinística función de base radial (RBF) resultó ser un método eficaz para el mapeo de la variabilidad espacial de los SOC_{STKs} en la cuenca hidrográfica de Kouhin (Irán) (Sarmadian y cols. 2014). El kriging tridimensional ordinario fue implementado para describir la distribución espacial de los SOC_{STKs} y para explorar los efectos de la textura y del tipo de uso del suelo en una llanura fluvial del condado de Quzhou (China) (Chen y cols. 2015).

Otros estudios han comparado el desempeño de diferentes métodos de interpolación. Bhunia y cols. (2018) utilizaron cinco métodos de interpolación: BRF, OK, distancia inversa ponderada (IDW), interpolación polinómica local (LPI) y kriging bayesiano empírico (EBK) para redactar mapas temáticos de la variabilidad espacial del SOC en el área de Medinipur Block (India). Los resultados de la validación cruzada mostraron que el OK fue el método de interpolación con el mejor rendimiento. En un área agrícola cercana a la ciudad de Archanes (Grecia) se aplicaron tres técnicas de interpolación diferentes: IDW, OK y RBF con el propósito de generar mapas temáticos de predicción de las propiedades del suelo superficial. Se evaluaron contenido de arcilla,

materia orgánica, carbonato de calcio total (CaCO₃) y conductividad eléctrica. El método determinístico IDW resultó ser la técnica de interpolación mas eficiente para describir la variabilidad espacial de la materia orgánica en esta área geográfica (Karydas y cols. 2009).

Zhang y Shao (2014) implementaron métodos probabilísticos para describir la distribución espacial de los SOC_{STKs} en un área aproximada de 40 km² del desierto de Gobi y por medio de ecuaciones empíricas calcularon el almacén de SOC (T.Stock_{SOC}). En la Tabla 1 se listan algunas investigaciones desde el 2006 a la fecha que se consideraron importantes para la programación de las actividad de muestreo y la implementación de los métodos de interpolación determinísticos y geoestadísticos. En particular, para cada investigación se verificó el número y/o densidad de las muestreas y se identificaron los factores específicos de los algoritmos utilizados (tipos de ecuaciones y de variograma).

Tabla 1. Estudios previos sobre el mapeo de los almacenes de carbono

Artículo científico		
País / Continente	Muestreo	Métodos de interpolación
Bojko O y Kabala C. 2017. Organic carbon pools in mountain soils - Sources of variability and predicted changes in relation to climate and land use changes. Catena 149: 209-220. DOI: 10.1016/j.catena.2016.09.022		
Polonia – Europa	52 perfiles de suelo (0-1 m) – 5 pisos altitudinales	<i>N.E.</i>
Campos A, Aguilar G y Landgrave R. 2014. Soil organic carbon stocks in Veracruz State (Mexico) estimated using the 1: 250,000 soil database of INEGI: biophysical contributions. J Soil Sediment 14(5): 860-871. DOI: 10.1007/s11368-014-0851-2		
México – América Central	163 perfiles de suelo (0-1 m) – 72410 km ² Aprox. 1 muestra / 444 km ²	Kriging Ordinario
Dorji T, Odeh I y Field D. 2014. Vertical distribution of soil organic carbon density in relation to land use/cover, altitude and slope aspect in the eastern Himalayas. Land 3(4): 1232-1250. DOI: 10.3390/land3041232		
Bután – Asia	93 muestras de suelo (0-20 cm) – 1014 km ² Aprox. 1 muestra / 11 km ²	Radial Basis Function

Artículo científico		
País / Continente	Muestreo	Métodos de interpolación
<p>Göl C, Bulut S y Bolat F. 2017. Comparison of different interpolation methods for spatial distribution of soil organic carbon and some soil properties in the Black Sea backward region of Turkey. <i>J Afr Earth Sci</i> 134: 85-91. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2017.06.014</p>		
Turquía – Asia	120 muestras de suelo (0-15 cm) – – 2 km ² Aprox. 1 muestra / 0.02 km ²	Distancia Inversa Ponderada – Cokriging – Block-Kriging
<p>Kumar S, Lal R, Liu D y Rafiq R. 2013. Estimating the spatial distribution of organic carbon density for the soils of Ohio, USA. <i>J Geogr Sci</i> 23(2): 280-296. DOI: 10.1007/s11442-013-1010-1</p>		
EE.UU. – Norteamérica	1424 perfiles de suelo (0-1 m) – 107311 km ² Aprox. 1 muestra / 75 km ²	Regresión Ponderada Geográficamente
<p>Osei AK, Kimaro AA, Peak D, Gillespie AW y Van Rees KCJ. 2018. Soil carbon stocks in planted woodlots and Ngitili systems in Shinyanga, Tanzania. <i>Agroforest Syst</i> 92(2): 251-262. DOI: 10.1007/s10457-016-0028-7</p>		
Tanzania – África	21 perfiles de suelo (0-1 m) – <i>N.E.</i>	<i>N.E.</i>
<p>Rial M, Cortizas AM y Rodríguez-Lado L. 2017. Understanding the spatial distribution of factors controlling topsoil organic carbon content in European soils. <i>Sci Total Environ</i> 609: 1411-1422. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.012</p>		
Europa	20000 muestras de suelo (0-15 cm) – 10180000 km ² Aprox. 1 muestra / 509 km ²	Regresión Random Forest
<p>Simbahan GC, Dobermann A, Goovaerts P, Ping J y Haddix M L. 2006. Fine-resolution mapping of soil organic carbon based on multivariate secondary data. <i>Geoderma</i> 132(3-4): 471-489. DOI: 10.1016/j.geoderma.2005.07.001</p>		
EE.UU. – Norteamérica	450 muestras de suelo (0-15 cm) – – 2.66 km ² Aprox. 1 muestra / 0.006 km ²	Kriging Ordinario – Cokriging – Kriging de Regresión
<p>Teng M, Zeng L, Xiao W, Huang Z, Zhou Z, Yan Z y Wang P. 2017. Spatial variability of soil organic carbon in Three Gorges Reservoir area, China. <i>Sci Total Environ</i> 599: 1308-1316. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.085</p>		
China – Asia	306 muestras de suelo (0-15 cm) – – 55000 km ² Aprox. 1 muestra / 179 km ²	Kriging Ordinario

Artículo científico		
País / Continente	Muestreo	Métodos de interpolación
Wei JB, Xiao DN, Zeng H y Fu YK. 2008. Spatial variability of soil properties in relation to land use and topography in a typical small watershed of the black soil region, northeastern China. Environ Geol 53(8): 1663-1672. DOI: 10.1007/s00254-007-0773-z		
China – Asia	306 muestras de suelo (0-20 cm) – 9.92 km ² Aprox. 1 muestra / 0.03 km ²	Kriging Ordinario
Zhang P y Shao M. 2014. Spatial Variability and Stocks of Soil Organic Carbon in the Gobi Desert of Northwestern China. PLoS ONE 9(4): e93584. DOI: 10.1371/journal.pone.0093584		
China – Asia	187 muestras de suelo (0-40 cm) 40 km ² Aprox. 1 muestra / 0.21 km ²	Kriging Ordinario

N. E.: no especificado.

Los antecedentes confirman que la calidad y la precisión de los mapas temáticos están estrechamente relacionadas con muestreos uniformes y que involucran todas las características ambientales del ecosistema (uso del suelo, vegetación, altitud, entre otros).

En México, se han realizado estudios a escala regional y local del contenido de carbono (C) referentes a la vegetación de los ecosistemas (Masera 1995, Acosta y Etchevers 2002). Sin embargo, hay escasas investigaciones enfocadas a la variabilidad espacial de los SOC_{STKs} en el horizonte superficial de los suelos. Segura-Castruita y cols. (2005) realizaron un mapa de la variabilidad espacial del SOC de todo el país con base en la “Evaluación de la Degradación del Suelo Causada por el Hombre en la República Mexicana escala 1:250000”. Para este trabajo se ocuparon 4583 muestras de suelo superficial, sin embargo, la relación entre el número de muestras y la superficie del país resulta insuficiente comparada con los otros antecedentes.

En este proyecto de investigación se realizó un análisis de la variabilidad espacial de los SOC_{STKs} en el ecosistema de alta montaña del Parque Nacional La Malinche (PNLM) a través de métodos de interpolación basados en GIS. En el PNLM están presentes diferentes paisajes como: pinares, bosques mixtos, pastizales naturales y agricultura de temporal, por lo tanto, se prestará especial atención a la variabilidad espacial de los SOC_{STKs} en relación

con el cambio de uso del suelo y la silvicultura. A diferencia de los antecedentes, un muestreo intensivo nos permitirá identificar las variaciones más pequeñas en los SOC_{STKs} , además, de determinar los sitios más adecuados para el desarrollo de proyectos de restauración ecológica activa y regeneración forestal. Al mapear los SOC_{STKs} en un ecosistema tan heterogéneo y con un fuerte impacto humano se analizarán los pros y los contras de los algoritmos de interpolación. Este estudio local, por lo tanto, podrá tomarse como referencias para el análisis de los SOC_{STKs} en todos los bosques templados que caracterizan la Faja Neovolcánica Transmexicana, donde la tala clandestina y el cambio de uso del suelo resultan ser las causas principales de las caídas de los almacenes de carbono (C).

3. JUSTIFICACIÓN

El análisis de la distribución espacial de las reservas de carbono orgánico del suelo (SOC_{STKs}) en el ecosistema de alta montaña La Malinche (PNLM) resulta ser una actividad prioritaria para obtener datos viables que nos consentirán determinar los factores que definen o afectan su variabilidad. La información generada nos permitirá hacer una evaluación del impacto del manejo del suelo sobre los SOC_{STKs} y proponer acciones de manejo sustentable puntuales para contribuir a mitigar el cambio climático global.

Los mapas temáticos de distribución espacial de los SOC_{STKs} representan una base cartográfica efectiva y detallada para planificar, diseñar y desarrollar proyectos de restauración ecológica activa, regeneración forestal y silvicultura. Estas estrategias sostenibles permiten aumentar los SOC_{STKs} y recuperar la funcionalidad y dinámica de los ecosistemas de montaña.

Los resultados de esta investigación podrán utilizarse para la redacción de material informativo útil en campañas de educación ambiental para fomentar en la población local una cultura de cuidado y manejo sostenible del PNLM. Resulta sumariamente importante asegurar la preservación de este ecosistema y de la biodiversidad de las especies silvestres poniendo particular atención a los procesos ecológicos, a los cambios naturales y a las intervenciones antropogénicas.

Finalmente, este proyecto de investigación será un modelo de referencia para el análisis de la distribución de los SOC_{STKs} en ecosistemas similares como las montañas de la Faja Neovolcánica Transmexicana.

4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuánto el uso del suelo, derivado de la conversión de las forestas en suelos agrícolas, ha contribuido y/o determinado la distribución espacial de las reservas de carbono orgánico del suelo (SOC_{STKs}) en el suelo superficial del Parque Nacional La Malinche?

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo General

Determinar la distribución espacial de las reservas de carbono orgánico del suelo (SOC_{STKs}) en el ecosistema de alta montaña del Parque Nacional La Malinche (PNLM) a través de métodos de interpolación basados en GIS.

5.2. Objetivos Específicos

- A. Determinar los SOC_{STKs} en los diferentes paisajes del PNLM.
- B. Identificar el método de interpolación espacial con mejor rendimiento para mapear la distribución de los SOC_{STKs} en el ecosistema de alta montaña del PNLM.
- C. Cuantificar la reserva total de SOC ($T.Stock_{SOC}$) en el ecosistema de alta montaña del PNLM.

6. METODOLOGÍA

6.1. Área de Estudio

La montaña Malinche o Matlalcuéyatl (Figura 1) se encuentra en el área medio oriental de México entre los Estados de Puebla y Tlaxcala (Latitud N desde 19°06'51'' a 19°20'58''; Longitud O desde 97°55'10'' a 98°09'46''), forma parte de la Faja Neovolcánica Transmexicana, se eleva hasta 4461 msnm y es la quinta montaña más alta del país.

El Parque Nacional La Malinche (PNLM), con un área aproximada de 462 km², es el onceavo parque con mayor extensión de los 67 parques nacionales decretados en México y representa una “región prioritaria para la conservación” por su alto valor biológico y cultural (Arriaga-Cabrera y cols. 2009).

El PNLM se caracteriza por diferentes tipos de paisajes: bosque de pinos, bosque de abetos, bosque de robles, bosques mixtos, pastizales naturales, páramo de altura y agricultura de temporal. Los suelos del PNLM se pueden agrupar en tres categorías principales: regosol, fluvisol, cambisol (IUSS WRB 2015). Las características del suelo, las pendientes pronunciadas y la corta distancia generan corrientes de agua muy rápidas que causan fuertes fenómenos erosivos. No hay corrientes permanentes, solo se encuentran corrientes estacionales.

La tala de grandes extensiones para el desarrollo de la agricultura y de la industria maderera, el pastoreo extensivo y los incendios forestales representan las principales amenazas para este ecosistema de montaña.

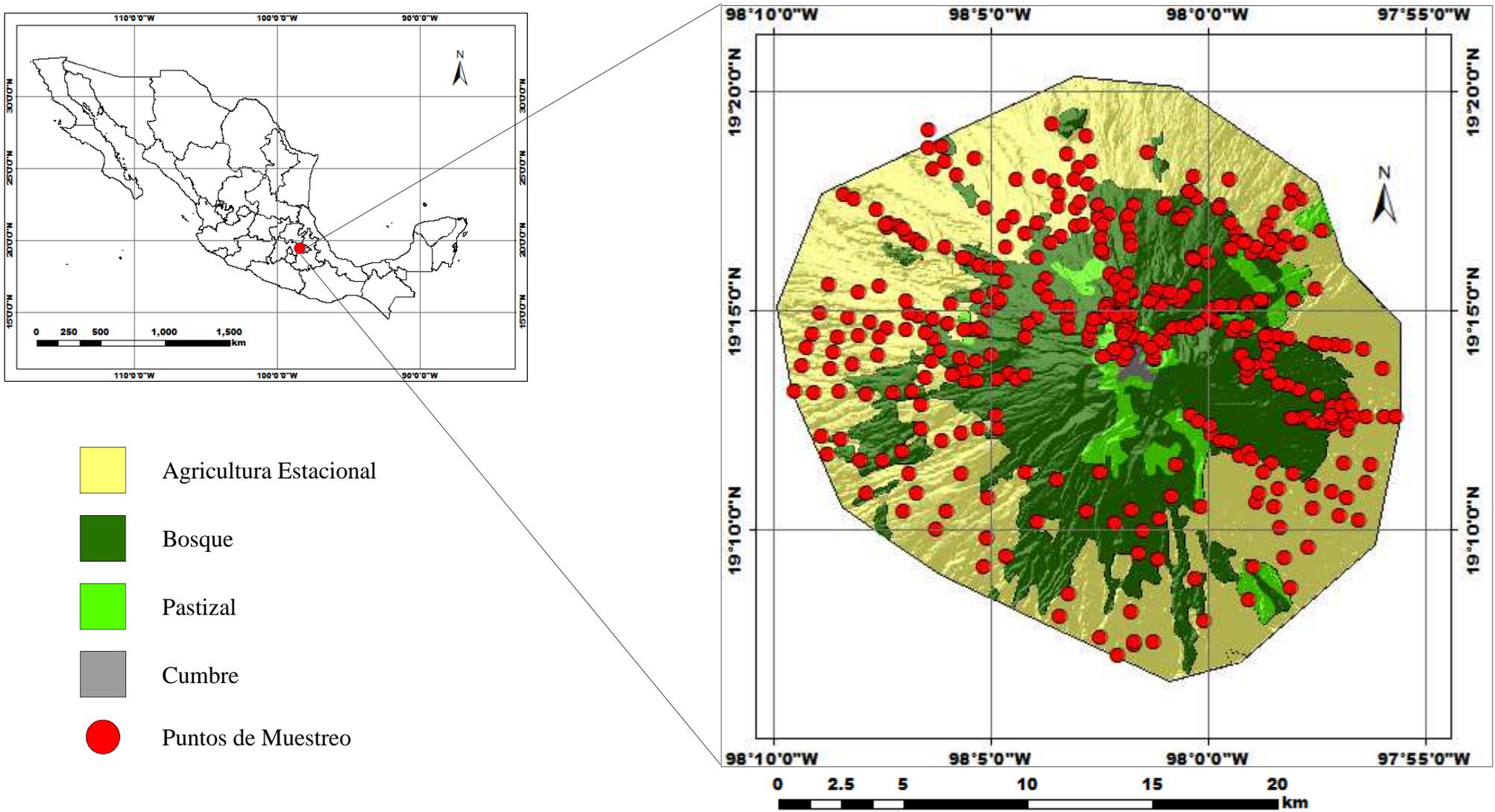


Figura 1. Área de Estudio: Parque Nacional La Montaña Malinche (PNLM)

6.2. Muestreo y Análisis de Laboratorio

Se realizó un estudio preliminar para identificar las diferentes características de uso del suelo en el ecosistema del PNLM. Como cartografía básica se usaron los mapas topográficos (escala 1:50000) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (INEGI): E14B33 (act. 2015), E14B34 (act. 2015), E14B43 (act. 2014) y E14B44 (act. 2015). El modelo de elevación digital (DEM) “Continuo de Elevaciones Mexicano” (CEM 3.0) de INEGI (2013) (INEGI <http://www.inegi.org.mx>) con una resolución de 15 m x 15 m fue necesario para analizar el gradiente altitudinal del PNLM.

El área geográfica del PNLM se dividió en una cuadrícula de 440 cuadrantes a través del software ArcGis 10.3.1, cada celda con una extensión de aproximadamente 100 ha. Los sitios de muestreo fueron diseñados para cubrir uniformemente el área de estudio e incluir los diferentes tipos de paisajes y uso de suelo, es decir, agricultura (163 muestras), bosques de pinos (177 muestras), bosques mixtos (76 muestras) y pastizales naturales (24 muestras).

Las actividades de campo se realizaron durante un período de tres meses desde septiembre hasta diciembre de 2016. En cada celda se recolectaron aleatoriamente 20 g del horizonte O y 500 g de muestra del horizonte A (0-20 cm), el espesor de la capa de materia orgánica (horizonte O) se midió con una regla. Simultáneamente, se utilizó un muestreador cilíndrico (dimensiones: altura 15 cm, diámetro 3 cm) para extraer el suelo destinado al análisis de la densidad relativa. Las coordenadas de cada sitio de muestreo se recopilaron con un sistema de posicionamiento global portátil (GPS, Garmin ETrex 20).

Las muestras de suelo y las muestras de materia orgánica se secaron al aire y se pasaron a través de un tamiz de 2 mm para el análisis de laboratorio (Motsara y Roy 2008). La textura del suelo se analizó por medio del método del hidrómetro de Bouyoucos (1962). El carbono orgánico del suelo (SOC) se cuantificó en un Analizador de Carbono Orgánico Total TOC-VCSN (Shimadzu, Canby, EE. UU). Los análisis de laboratorio se desarrollaron durante un semestre desde Febrero hasta a Julio 2017 en los laboratorios del departamento de Biotecnología del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV, México) bajo la dirección del Dr. Luc Dendooven y con el apoyo del Dr. Frédéric Thalasso Siret.

6.3. Métodos de Interpolación

Los algoritmos determinísticos y geoestadísticos basados en GIS resultan efectivos para describir la distribución espacial de las propiedades del suelo. El GIS permite asociar a una base de datos geográficos los valores de los parámetros ambientales con el objetivo de crear mapas predictivos de distribución espacial (Scull y cols. 2003). Las técnicas determinísticas crean superficies a partir del conjunto de muestras en función del grado de similitud, proximidad y homogeneidad del muestreo. Los métodos geoestadísticos utilizan un enfoque diferente y crean superficies a partir de las propiedades estadísticas del conjunto de muestras.

En este proyecto doctoral se implementaron en ArcGIS 10.3.1. tres técnicas de interpolación determinísticas: distancia inversa ponderada (IDW), interpolación polinómica local (LPI), función de base radial (BRF) y tres técnicas geoestadísticas: kriging ordinario (OK), kriging bayesiano empírico (EBK) y cokriging (CK) para crear mapas temáticos de los SOC_{STKs} del suelo superficial del PNLN. Las técnicas fueron aplicadas según lo descrito por Johnston y cols. (2001).

6.3.1. Distancia Inversa Ponderada (IDW)

La IDW es una técnica de interpolación determinística utilizada para describir la distribución espacial del SOC (Bhunja y cols. 2018). La IDW determina los valores de celda a través de una combinación linealmente ponderada de un conjunto de puntos de muestra. La ponderación es una función de la distancia inversa. La IDW utiliza los valores de las muestras que rodean una ubicación específica no medida para predecir el valor del SOC_{STKi} . Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde la ubicación de la muestra. En consecuencia los valores más cercanos a la ubicación de predicción tienen más influencia en el valor estimado que los valores más alejados (Johnston y cols. 2001). Los mejores resultados de la IDW se consiguen cuando el muestreo es lo suficientemente denso con respecto a la variación local (Watson y Philip 1985).

El algoritmo de la IDW se describe por medio de la Ecuación 1:

$$Z(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{x_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (1)$$

$Z(x_0)$ es el valor del parámetro interpolado, N representa el número de sitios de muestreo, x_i es el i -ésimo valor de los datos, h_{ij} es la distancia entre la ubicación de predicción y las muestras cercanas y finalmente β denota la potencia de ponderación.

6.3.2. Función de Base Radial (RBF)

La RBF es una técnica de interpolación determinística que utiliza una de las cinco funciones de base radial para crear superficies que pasan exactamente a través de los puntos de muestreo de entrada. El conjunto de RBF se compone de spline, spline con tensión, spline completamente regularizada, función multicuadrática y función multicuadrática inversa. Cada función tiene una forma diferente y da como resultado una superficie de interpolación diferente. El objetivo común de cada función es minimizar la curvatura total de la superficie de interpolación (Johnston y cols. 2001). La RBF se diferencia de los interpoladores polinómicos globales y locales porque dichas técnicas no requieren que la superficie de interpolación pase a través de los puntos de muestreo y se consideran como interpoladores inexactos.

El método de RBF no es adecuado cuando los puntos de muestreo vecinos muestran valores de SOC_{STKs} muy diferentes (ESRI 2001, Losser y cols. 2014). En este estudio de tesis doctoral se seleccionó la función spline con tensión que generalmente produce los mejores desempeños en la especialización de los parámetros ecosistémicos del suelo (ESRI 2001).

6.3.3. Interpolación Polinómica Local (LPI)

La LPI es una técnica de interpolación determinística utilizada frecuentemente para mapear la distribución espacial de los SOC_{STKs} . La técnica no realiza una interpolación exacta y la superficie generada por el algoritmo es lisa y no presenta cúspides. Las curvas de

interpolación, en zonas específicas predeterminadas, suelen no pasar a través de todos los puntos de muestreo. Para una correcta implementación del método LPI, es necesario detallar adecuadamente el área de cercanía. El método es capaz de producir superficies que capturan la variación de corto alcance (ESRI 2001).

6.3.4. Kriging Ordinario (OK)

El OK es un método de interpolación geoestadístico que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores z (Isaaks y Srivastava 1989). Como para la IDW, los pesos de los puntos de muestreo cercanos tienen un fuerte impacto en los resultados. El OK incorpora las propiedades estadísticas del conjunto de datos de muestreo mediante autocorrelación espacial, mientras que los pesos de kriging provienen de un semivariograma que permite analizar el comportamiento espacial (distancia mínima y distancia máxima de influencia de los datos) de una variable sobre un área definida (ESRI 2001).

En el OK, los valores en las ubicaciones no muestreadas $Z^*(x_0)$ se determinaron mediante un promedio móvil lineal ponderado de los valores en las ubicaciones cercanas, es decir:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(x_i) \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \tag{3}$$

λ_i es el peso asignado al valor de la variable en la ubicación x_i y es determinado con base en un semivariograma; N representa el número de observaciones cercanas.

El error de estimación $\sigma_k^2(x_0)$ en cualquier punto x_0 se estima por medio de la siguiente ecuación:

$$\sigma_k^2(x_0) = \mu + \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_0 - x_i)$$

(4)

μ es el parámetro de Lagrange necesario para minimizar la varianza del operador kriging, $\gamma(x_0-x_i)$ es el valor del semivariograma correspondiente a la distancia entre x_0 y x_i (Vauclin y cols. 1983, Agrawal y cols. 1995).

El modelo del semivariograma (Ecuación 5) se utiliza como la herramienta básica para examinar la estructura de la distribución espacial de las propiedades del suelo y se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (5)$$

$\gamma(h)$ es la semivariancia, h la distancia, Z el parámetro del suelo a mapear, $N(h)$ es el número de sitios de muestreo separados de una distancia h de la ubicación de predicción, $Z(x_i)$ y $Z(x_i + h)$ son los valores de Z en las posiciones x_i y $x_i + h$ (Wang y Shao 2013).

6.3.5. Kriging Bayesiano Empírico (EBK)

El EBK es un método de interpolación geoestadística que requiere interacciones mínimas ya que automatiza los pasos para crear la superficie de interpolación y calcula los parámetros mediante un proceso de subconjuntos y simulaciones. La técnica desarrolla muchos semivariogramas (espectro de semivariogramas) en lugar de un solo semivariograma. Este aspecto lo diferencia de otros métodos de kriging clásicos y lo convierte en un algoritmo de predicción espacial no estacionario y robusto al mismo tiempo (Krivoruchko 2012, Krivoruchko y Butler 2013).

6.3.6. Cokriging (CK)

El CK es un método de interpolación geoestadística que utiliza conjuntos de datos adicionales o variables secundarias (hasta cuatro) para obtener una mejor aproximación de los valores de la variable primaria pronosticados e, hipotéticamente, crear un mapa de mayor detalle y precisión, reduciendo la varianza del error de estimación (Yalçin 2005).

Las variables secundarias generalmente están correlacionadas espacialmente con la variable principal (Yalçin 2005, Zhang 2012). La altitud, el índice de vegetación de

diferencia normalizada (NDVI) y la pendiente del terreno fueron las variables secundarias utilizadas para implementar el CK en este estudio.

6.4. Validación Cruzada

La validación cruzada es un método estadístico para evaluar y comparar la eficiencia de los algoritmos de interpolación. El conjunto de puntos de muestreo se dividió arbitrariamente en dos bases de datos. El primer conjunto de datos, compuesto por 395 muestras, se utilizó para capacitar y entrenar cada modelo de interpolación, el segundo conjunto de datos, que consta de las 45 muestras restantes, se empleó para validar los seis métodos. Los dos set de datos se crearon de manera aleatoria con el objetivo de cubrir uniformemente el área de estudio.

Los índices utilizados durante la validación cruzada fueron: error medio estandarizado (ME), error cuadrático medio (RMSE) y error relativo medio (MRE). Los tres índices son complementarios y se aplicaron según lo descrito por Yang y cols. (2009) y Bhunia y cols. (2018) (Ecuaciones 6,7,8):

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N [Z(x_i) - Z'(x_i)]}{N} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [Z(x_i) - Z'(x_i)]^2}{N}} \quad (7)$$

$$MRE = \frac{RMSE}{\Delta} \quad (8)$$

para cada punto de muestreo $Z(x_i)$ representa el valor de SOC_{STK_i} , mientras que $Z'(x_i)$ representa el valor pronosticado derivado por los métodos de interpolación; N es la cantidad de puntos de validación; Δ es el rango entre el valor máximo observado y el dato mínimo.

6.5. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Los índices de vegetación son combinaciones de las bandas espectrales registradas por los satélites de Teledetección. Las imágenes calculadas a partir de operaciones algebraicas

entre distintas bandas espectrales tienen la finalidad de resaltar la vegetación en función de su respuesta espectral y atenuar los detalles de otros elementos ambientales. El NDVI uno de los índices de vegetación más utilizados (Tucker 1979, Tucker 1986, Tucker y cols. 2005), su fórmula matemática se describe a través de siguiente ecuación (Ecuación 9):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (9)$$

NIR es la reflectividad en el infrarrojo cercano y RED es la reflectividad en el rojo.

Para el estudio de NDVI se usaron 12 imágenes satelitales mensuales (enero a diciembre de 2017) OLI LandSAT 8. La constelación de satélites LandSAT es un proyecto coordinado de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (NASA) para el monitoreo de los recursos naturales terrestres. Las imágenes OLI LandSAT 8 han sido preliminarmente procesada con el algoritmo de corrección atmosférica "Dark Object Subtraction" (DOS1) (Ding y cols. 2015) y se utilizaron los datos de reflectancia en lugar de números digitales.

6.6. Estimación de la Reserva de Carbono Orgánico del Suelo ($T.Stock_{SOC}$)

Para cada muestra, el stock de carbono orgánico del suelo (SOC_{STKi}) (t/ha) se estimó de acuerdo con lo descrito por Zhang y cols. (2015) (Ecuación 10):

$$SOC_{STKi} = \frac{SOC_i * BD_i * d * (1 - CF_i)}{10} \quad (10)$$

SOC_i es la concentración del carbono orgánico del suelo ($g\ kg^{-1}$) de la muestra i -ésima, BD_i representa la densidad del suelo ($g\ cm^{-3}$), d es el espesor de la capa superficial (15 cm) y finalmente CF_i es un indicador de la fracción gruesa del suelo (%).

La reserva total carbono orgánico del suelo ($T.Stock_{SOC}$) (Tg) del PNLM se calculó con base en la siguiente ecuación (Ecuación 11):

$$T.Stock_{SOC} = \left(\sum_{i=1}^n \overline{SOC_{STKi}} * S_i \right) * 10^{-6} \quad (11)$$

donde S_i es la superficie de cada paisaje (agricultura de temporal, bosque y pastizal) en ha, mientras que $\overline{SOC_{STKi}}$ representa el valor medio del almacén de carbono orgánico del suelo en t/ha.

Para el cálculo del $T.Stock_{SOC}$ del PNLM del año 1938 se utilizó el valor promedio de los SOC_{STKi} encontrados en el bosque de la parte norte del polígono (Estado de Tlaxcala) que ha resultado ser una zona con perturbaciones antropogénicas mínimas y con una estructura vegetal íntegra, por lo tanto similar y/o correspondiente al pasado.

7. RESULTADOS

7.1. Variabilidad del Carbono Orgánico del Suelo (SOC)

La distribución espacial del carbono orgánico del suelo (SOC) en el Parque Nacional La Malinche (PNLM) está influenciada por muchos patrones ambientales como: clima, topografía, textura del suelo, unidades de paisaje, actividades humanas y otros factores de microescala (Arriaga-Cabrera y cols. 2009).

El resumen estadístico del SOC en el horizonte A del PNLM está reportado en la Tabla 2, mientras que la tendencia del SOC con la altitud está descrita en la Figura 2.

Tabla 2. Resumen estadístico del carbono orgánico del suelo (SOC) en el horizonte A del Parque Nacional La Malinche (PNLM)

	N ^a	min ^b	Max ^c	Media	Mediana	SD ^d	CV ^e	A ^f	IQR ^g
SOC [g kg ⁻¹]									
Ecosistema	440	2.33	114.87	25.81	22.76	22.10	85.66	0.96	35.84
Bosque	253	8.02	114.87	40.31	37.81	18.55	45.91	0.97	24.54
Pastizal	24	2.63	21.73	12.82	11.66	5.17	40.63	0.90	6.29
Agricultura estacional	163	2.33	14.26	5.19	4.91	1.98	38.15	1.93	2.19

^a N: número de muestras, ^b min: mínimo, ^c Max: máximo, ^d SD: desviación estándar, ^e CV: coeficiente de variación, ^f IQR: rango intercuartil.

Los niveles altitudinales del Parque Nacional están caracterizados por diferentes tipos de paisaje, vegetación y clima en consecuencia la concentraciones de SOC variaron sensiblemente (CV: 85.66 %) a lo largo de todo el polígono. A continuación describo la variación del SOC en los diferentes niveles altitudinales del PNLM, desde los 2200 msnm hasta la cumbre del volcán.

De los 2200 a 2500 msnm el clima es templado semiárido, la temperatura media anual oscila entre 14 y 16 °C, la precipitación media anual varía entre 600 y 800 mm. En esta región predominan la vegetación inducida y cultivos temporales (Arriaga-Cabrera y cols. 2009). El SOC en el horizonte A varió entre 3.13 g kg⁻¹ y 12.52 g kg⁻¹ con media de 6.13 g kg⁻¹, desviación estándar 2.41 g kg⁻¹ y asimetría de 1.59. El suelo se caracterizó por una textura arenosa o franco arenosa. En general, el suelo arable no presentó un horizonte

O, con excepción de unos pocos cultivos donde se aplicaron prácticas agrícolas de conservación, en dichas zonas el horizonte O alcanzó un espesor de 3 cm y el SOC varió en un rango entre 289.12 g kg⁻¹ y 387.27 g kg⁻¹.

De los 2500 a 3000 msnm el clima es templado subhúmedo, la temperatura media anual oscila entre 10 y 16 °C, la precipitación media anual varía entre 700 y 1000 mm. Esa zona se caracteriza por vegetación de pinos, robles y cultivos (Arriaga-Cabrera y cols. 2009). El SOC en el horizonte A varió entre 2.33 g kg⁻¹ y 44.32 g kg⁻¹ con media de 13.24 g kg⁻¹, desviación estándar 11.64 g kg⁻¹ y asimetría de 0.93. El suelo presentó principalmente una textura franco arenosa y en unas ocasiones arena gruesa. En el bosque, el horizonte O alcanzó un espesor de 16 cm y el SOC varió en un rango entre 287.82 g kg⁻¹ y 412.47 g kg⁻¹.

De los 3000 a 3500 msnm es predominante un clima semi-frío y húmedo, la temperatura media anual está entre 6 y 8 °C, la precipitación media anual varía entre 800 y 1000 mm. El paisaje está compuesto principalmente por bosques de pinos y abetos (Arriaga-Cabrera y cols. 2009). El SOC en el horizonte A fue muy variable debido a las características heterogéneas del paisaje y osciló en un rango entre 2.81 g kg⁻¹ y 100.82 g kg⁻¹, con media de 46.90 g kg⁻¹, desviación estándar 17.50 g kg⁻¹ y asimetría de 0.28. La textura del suelo fue principalmente franco arenosa. Los horizontes O de esta zona alcanzaron un espesor de aproximadamente 35 cm en algunos casos y el SOC varió en un rango entre 291.23 g kg⁻¹ y 484.20 g kg⁻¹.

De los 3500 a 4000 msnm el clima es frío, la temperatura media anual está entre 4 y 6 °C, excepto en los meses de invierno caracterizados por temperaturas bajo cero con presencia ocasional de nieve y la precipitación media anual varía entre 1000 y 1200 mm. La vegetación se compone de bosques de pinos, en particular *Pinus hartwegii* Lindley 1839 (Arriaga-Cabrera y cols. 2009). El SOC en el horizonte A varió entre 8.12 g kg⁻¹ y 114.87 g kg⁻¹, el valor mas significativo se encontró en un bosque de pinos a aproximadamente 3750 msnm. El contenido medio de SOC fue de 38.42 g kg⁻¹, la desviación estándar 25.85 g kg⁻¹ y la asimetría 0.98. El regosol, predominante en esta zona, mostró una textura franco arenosa. El horizonte O fue muy variado con espesores entre 2 y 30 cm y SOC entre 284.76 g kg⁻¹ a 473.12 g kg⁻¹.

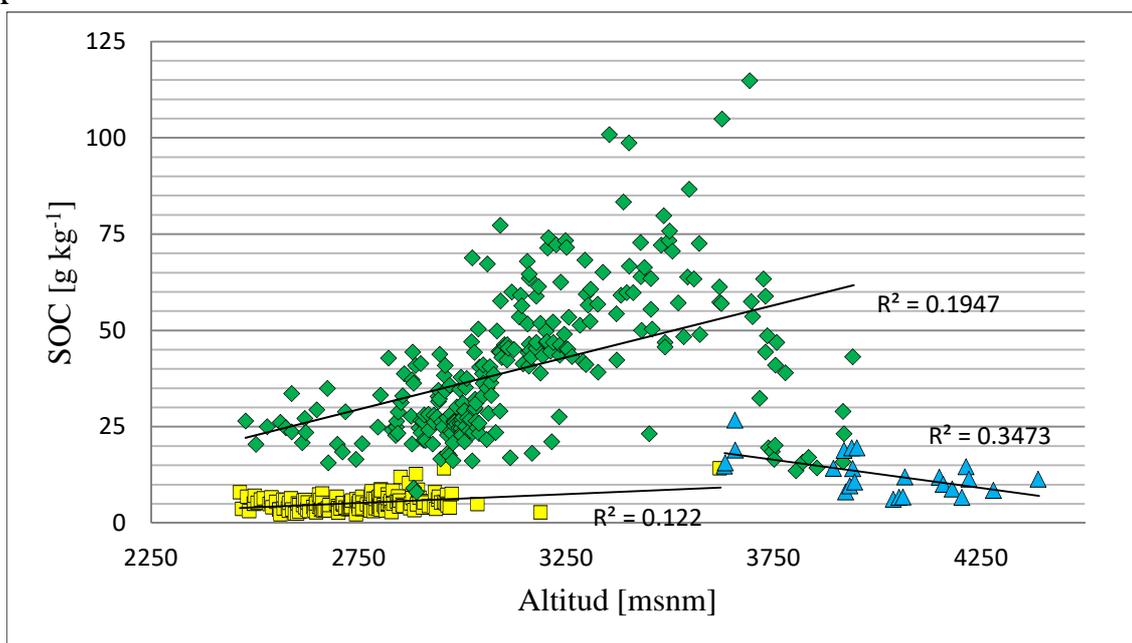
Arriba de los 4000 msnm, las condiciones climáticas extremas han permitido solamente la presencia de pastizales naturales y páramos de altura (Arriaga-Cabrera y cols.

2009). La morfología en la parte superior del volcán es relativamente joven, con picos empinados y poco suelo (regosol) formado sobre los depósitos volcánicos más recientes. El regosol presentó un color gris claro y textura franco arenosa. El SOC en el horizonte A varió entre 2.63 g kg^{-1} y 21.73 g kg^{-1} con media de 12.82 g kg^{-1} , desviación estándar 5.28 g kg^{-1} y asimetría de 0.90. El horizonte O fue generalmente menor de 2 cm de espesor debido a las pendientes acentuadas y la erosión hídrica y eólica, y el SOC alcanzó un valor de 315.39 g kg^{-1} .

El pico de la montaña (70 ha aproximadamente) está conformado exclusivamente por piedras volcánicas.

Los datos de SOC ocupados fueron estadísticamente significativos ($p < 0.05$) en cada uno de los 3 paisajes del PNLM; es decir $p < 0.001$ en los suelos forestales y en los suelos agrícolas, $p = 0.0024$ en los suelos dominados por pastizales. La altitud explica solo parcialmente la variación de SOC en los 3 paisajes del PNLM, y tiene una influencia igual aproximadamente al 35 % únicamente en la zonas de pastizales de alta montaña cerca de la cumbre del volcán (Figura 2).

A



B

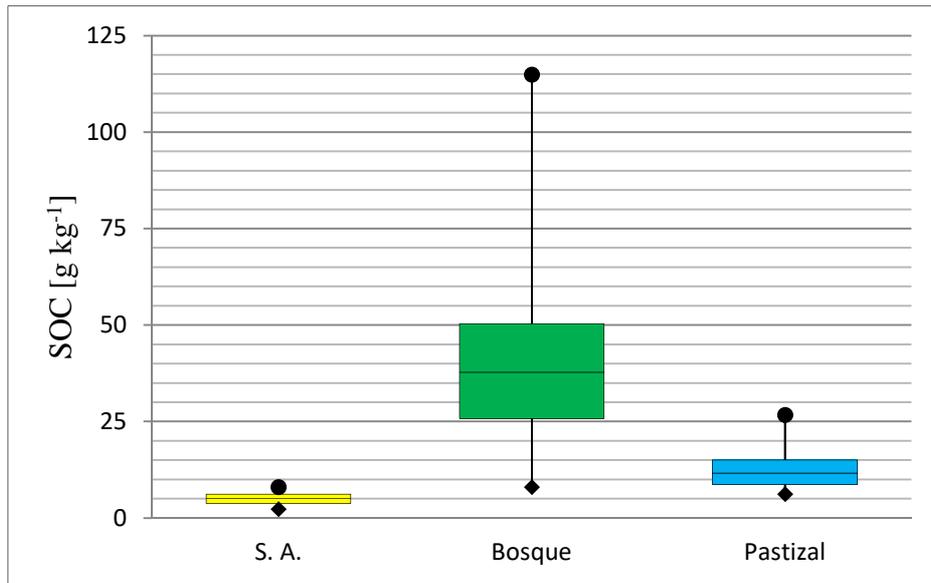


Figura 2. A. Diagrama de dispersión - \blacklozenge : carbono orgánico del suelo (SOC) en el horizonte A del bosque del Parque Nacional La Malinche (PNLM), \blacksquare : SOC en agricultura estacional, \blacktriangle en suelo de pastizales. y B. Boxplot - Contenido de carbono orgánico del suelo (SOC) del horizonte A y el uso del suelo - en el PNLM. S.A.: Agricultura estacional.

7.2. Variabilidad del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), que describe el verdor de la vegetación, en el bosque de PNLM varió en un rango amplio entre 0.23 y 0.46 (media 0.32) (Figura 3). Se consideraron solo los valores NDVI pertenecientes al paisaje forestal ya que los suelos agrícolas y los suelos de pastizal de altura tienen una escasa vegetación arbórea; los valores de NDVI en dichos paisajes podrían ser engañosos e inadecuados para los objetivos de investigación.

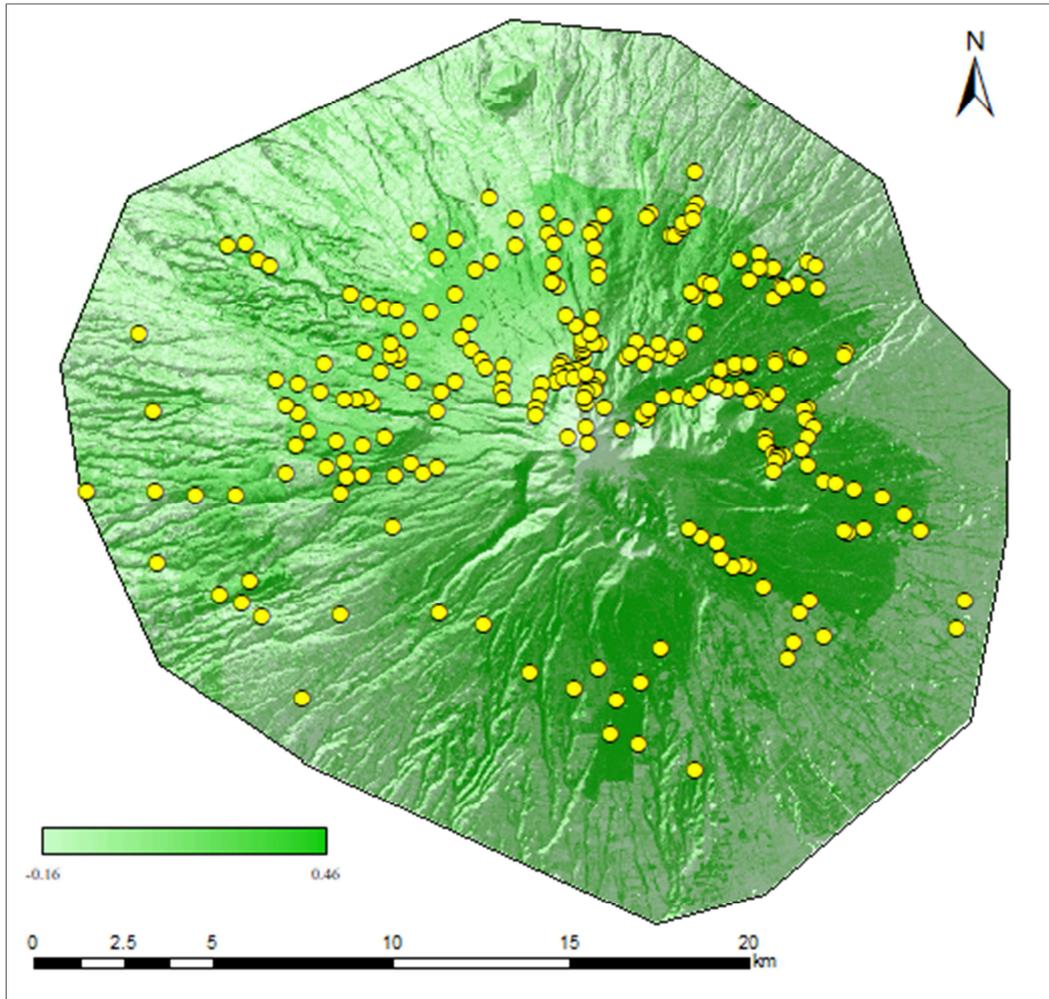


Figura 3. Distribución espacial del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en Parque Nacional La Malinche (PNLM). • sitios de muestreo.

Los valores más significativos se registraron en los bosques del estado de Tlaxcala (parte norte de PNLM) y oscilaban entre 0.35 y 0.40. Esta área también se caracterizó por los valores más grandes de SOC en el horizonte A que estuvieron en un rango entre 67.32 g kg⁻¹ a 100.81 g kg⁻¹. En el estado de Puebla (parte sur de PNLM), el NDVI del bosque varió en un rango restringido, es decir, entre 0.25 y 0.32, mientras que el SOC en el horizonte A osciló entre 34.66 g kg⁻¹ a 71.53 g kg⁻¹.

En el PNLM, los valores de NDVI se correlacionaron positivamente con el SOC del horizonte A (Figura 4).

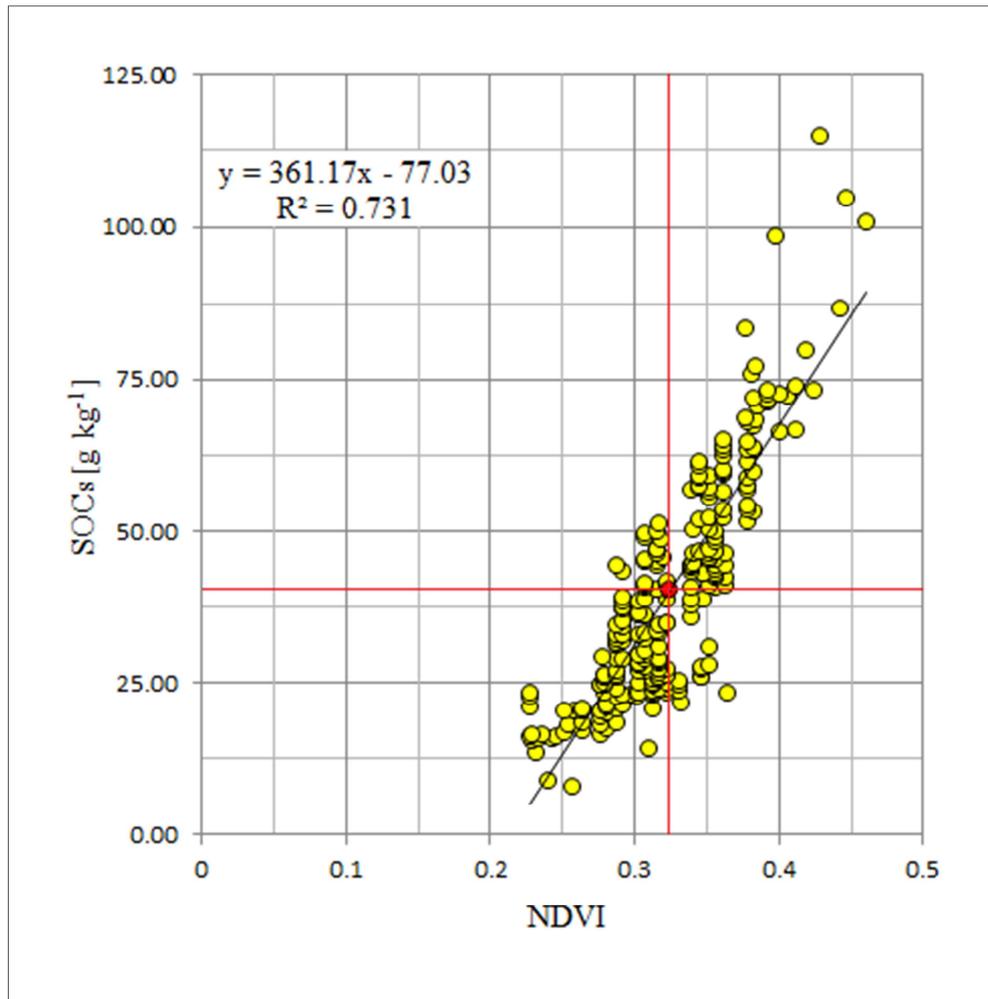


Figura 4. Diagrama de dispersión: correlación entre el contenido de carbono orgánico del suelo (SOC) del horizonte A y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el Parque Nacional La Malinche (PNLM)

Los valores de NDVI fueron estadísticamente significativos ($p < 0.05$). El NDVI y en consecuencia, la estructura y la densidad de la vegetación primaria y arbustiva explican satisfactoriamente la variación del SOC en horizonte A del suelo superficial a lo largo de todo el paisaje forestal del PNLM.

7.3. Reserva de Carbono Orgánico del Suelo ($T.Stock_{SOC}$)

Los stocks de carbono orgánico del suelo (SOC_{STKs}) en el horizonte A del PNLM variaron de 3.81 t ha^{-1} a 196.33 t ha^{-1} , y fueron mayores en el paisaje forestal (media 68.94 t ha^{-1}) que en pastizal (media 21.81 t ha^{-1}) y suelos agrícolas (media 8.82 t ha^{-1}).

En los suelos agrícolas con labranza de mantenimiento (estado de Tlaxcala) se registraron SOC_{STKs} notables (media $20.51 \text{ t C ha}^{-1}$), mientras que en los cultivos donde

prevalecían las prácticas agrícolas más convencionales, los SOC_{STK_i} fueron considerablemente más bajos (media 4.14 t ha^{-1}) (estado de Puebla).

Los SOC_{STK_i} en el horizonte O del PNLN oscilaron en un rango entre de 0 t ha^{-1} a 386.23 t ha^{-1} . Los espesores del horizonte O fueron muy variables a lo largo de los paisajes del PNLN con media de 5.31 cm en los suelos forestales y media inferior a 2 cm en los pastizales. El horizonte O fue casi inexistente en los suelos agrícolas investigados.

La reserva (stock) total de carbono orgánico del suelo ($T.Stock_{SOC}$) (horizonte O + horizonte A) del PNLN se estimó en 2.44 Tg . El mayor aporte fue del paisaje forestal con 2.09 Tg C (85.31% del $T.Stock_{SOC}$), de los cuales 0.83 Tg C correspondieron con el horizonte O y 1.26 Tg C con el horizonte A. Los suelos agrícolas contribuyeron con 0.28 Tg C (11.40% del $T.Stock_{SOC}$), 0.05 Tg C en el horizonte O y 0.23 Tg C en el horizonte A. Finalmente, el aporte de las áreas de pastizal también fue pequeño con solo 0.07 Tg C , equivalente al 3.31% del $T.Stock_{SOC}$ en el PNLN.

El $T.Stock_{SOC}$ en el PNLN estimado para el año 1938 fue de 4.98 Tg y desde entonces se ha reducido a la mitad. Si esta tendencia continuara constante y todo el bosque restante se convirtiera en suelos agrícolas el $T.Stock_{SOC}$ caería inevitablemente hasta a 0.52 Tg .

7.4. Efectividad de los Métodos de Interpolación

Todos los métodos de interpolación utilizados describieron satisfactoriamente la distribución espacial de los SOC_{STK_s} en el PNLN (Figuras 5-6). En el resumen estadístico de los seis métodos de interpolación se destaca que el CK fue el método con mayor eficiencia alcanzando un coeficiente de determinación (valor R^2) igual a 0.87 . En cambio, la técnica de interpolación determinística del LPI obtuvo el rendimiento más bajo y un R^2 de 0.82 (Tabla 3).

El error cuadrático medio (RMSE) varió en un rango limitado entre 14.157 del IDW a 15.288 del LPI. En cambio, el error medio estandarizado (ME) osciló entre -4.282 del OK y -6.283 del LPI. El error relativo medio (MRE) permaneció sustancialmente constante, independientemente del método de interpolación utilizado.

Según los resultados de la validación cruzada los desempeños de las técnicas de interpolación siguen este orden CK – OK – IDW – EBK- RBF – LPI. No se encontraron diferencias significativas en los índices de validación cruzada y R^2 entre las técnicas OK y CK, en consecuencia, la densidad y el número de muestras analizadas fueron idóneas para

redactar mapas de los SOC_{STKS} de alta calidad y precisión. En este ecosistema, otros parámetros secundarios, como NDVI, altitud y pendiente del terreno desempeñaron un papel secundario en la distribución espacial de los SOC_{STKS}.

Tabla 3. Parámetros de validación cruzada y eficiencia de los métodos interpolación

Métodos de interpolación	Eficiencia	Error		
	R ² ^a	RMSE ^b	ME ^c	MRE ^d
Cokriging (CK)	0.875	14.534	-4.370	0.103
Ordinary kriging (OK)	0.869	14.259	-4.282	0.101
Empirical Bayes kriging (EBK)	0.844	15.021	-4.847	0.096
Inverse distance weighting (IDW)	0.852	14.157	-4.367	0.108
Local polynomial interpolation (LPI)	0.827	15.288	-6.283	0.095
Radial basis function (RBF)	0.834	15.117	-4.666	0.112

^a R²: coeficiente de determinación, ^b RMSE: error cuadrático medio, ^c ME: medio estandarizado, ^d MRE: error relativo medio.

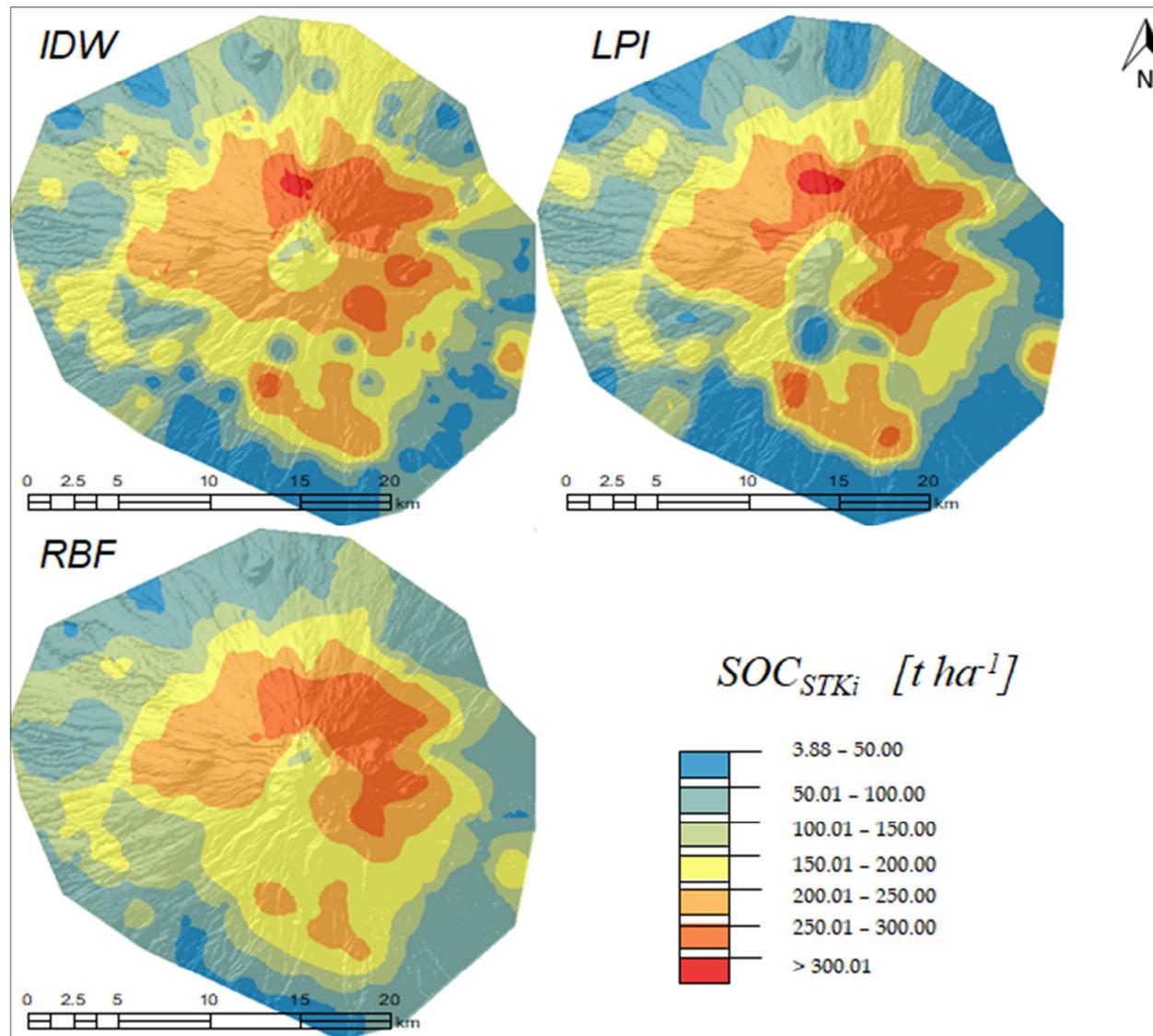


Figura 5. Distribución espacial de los almacenes carbono orgánico del suelo (SOC_{STK_i}) en el suelo superficial del Parque Nacional La Malinche (PNLM) mediante métodos determinísticos. IDW: distancia inversa ponderada, LPI: interpolación polinómica local, RBF: función de base radial, SOC_{STK_i} : stock de carbono orgánico del suelo.

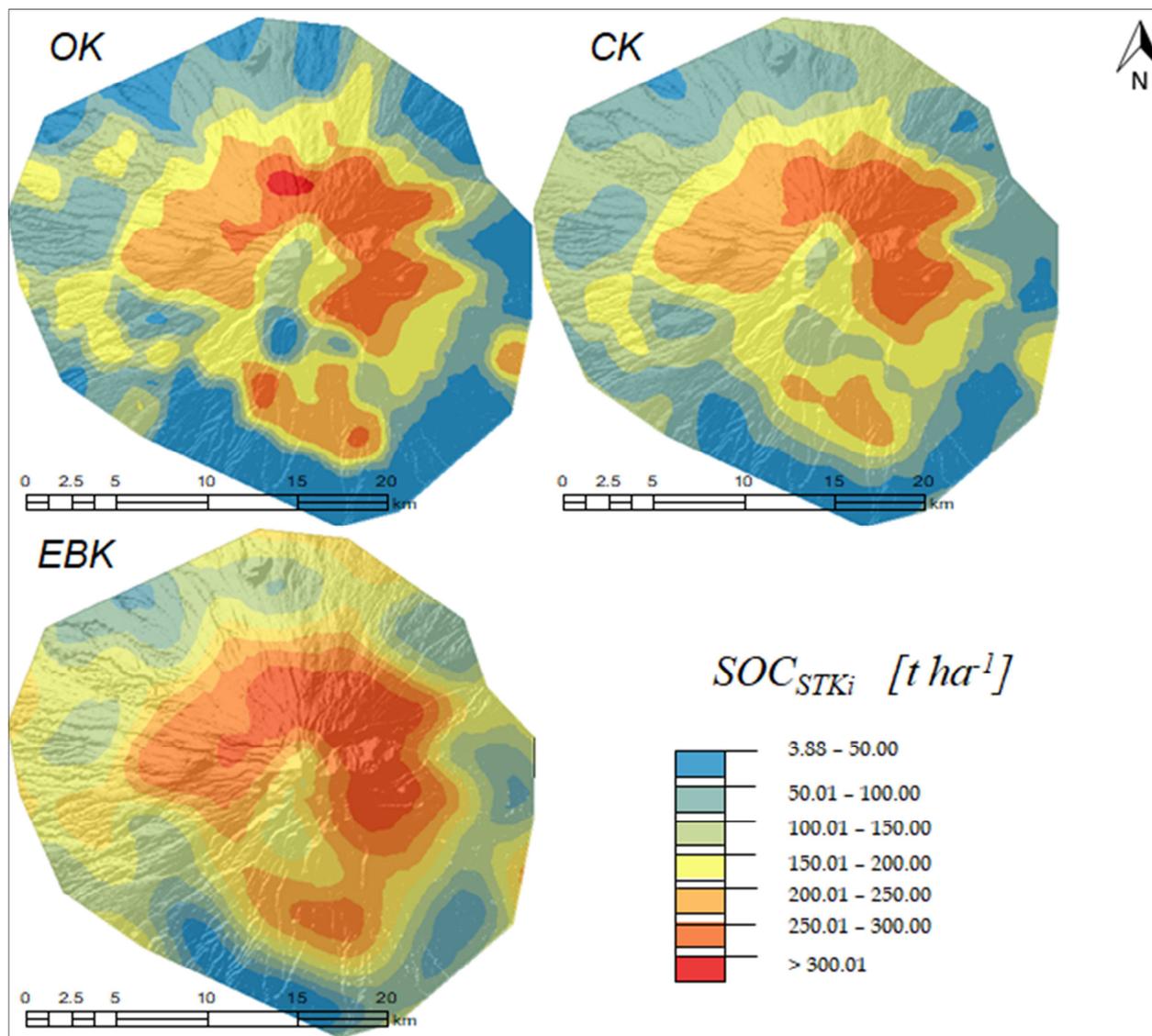


Figura 6. Distribución espacial de los stocks carbono orgánico del suelo (SOC_{STK_i}) en el suelo superficial del Parque Nacional La Malinche (PNLM) mediante métodos geoestadísticos. OK: kriging ordinario, EBK: kriging bayesiano empírico, CK: cokriging, SOC_{STK_i} : stock de carbono orgánico del suelo.

8. DISCUSIÓN

8.1. Patrones de Distribución de las Reservas Ecosistémicas de Carbono Orgánico del Suelo (SOC_{STKs})

La estructura de la vegetación, la cantidad y el tipo de residuos orgánicos (mantillo) son los factores más importantes que determinan las reservas ecosistémicas del carbono orgánico del suelo (SOC_{STKs}) (Signor y cols. 2018). El cambio de uso del suelo de los terrenos forestales para establecer cultivos (temporales o permanentes) causa una reducción drástica en la cubierta forestal y consecuentemente una rápida caída de los SOC_{STKs} (Guo y Gifford 2002, Wilson y cols. 2008).

Los SOC_{STKs} registrados en los suelos agrícolas del Parque Nacional La Malinche (PNLM) fueron inferiores a los valores reportados para suelos cultivables en otras investigaciones (Wang y cols. 2004, Pan y cols. 2005, Liu y cols. 2011, Zhao y cols. 2017). Campos y cols. (2014) encontraron un $\overline{\text{SOC}_{\text{STKi}}}$ de 151.10 t ha^{-1} en el suelo superficial (1 m) de una zona agrícola de Veracruz (Golfo de México, México), en promedio, el 36% de carbono (C) estuvo presente en los primeros 20 cm del terreno.

Las prácticas agrícolas convencionales son comunes entre los agricultores en el PNLM. Los monocultivos (maíz o frijoles), la labranza intensiva y la quema de residuos agrícolas implican la eliminación de la capa de materia orgánica del suelo del horizonte O del cual el carbono orgánico del suelo (SOC) es el componente principal (Bellamy y cols. 2005, Du y cols. 2010, Moussadek y cols. 2014), además, dichas acciones magnifican los efectos de la erosión hídrica y eólica. Por otro lado, las prácticas agrícolas de conservación como la reducción de la labranza, la rotación y la diversificación de los cultivos y la retención del mantillo de residuos en los campos tienen como objetivo fundamental conservar, mejorar y hacer un uso más sostenible de los recursos naturales y de las reservas de carbono (C) (West y Post 2002, Dabney y cols. 2004). Estas prácticas agrícolas de conservación no están muy extendidas entre las personas y comunidades del PNLM, aunque son más comunes en la parte norte (Tlaxcala) que en la parte sur del polígono (Puebla). Unos pocos campesinos aplican estiércol de corral a sus cultivos, sin embargo, la falta de animales de granja limita esta práctica y son aún menos los agricultores que utilizan el sistema tradicional de policultivo milpa ya que requiere mucha mano de obra

(Wang y cols. 2004); en estos últimos y esporádicos cultivos se registraron valores de los SOC_{STKs} .

Los valores de SOC_{STKs} de los suelos forestales del PNLM variaron en un rango muy amplio, pero el $\overline{SOC_{STKi}}$ de 68.90 t ha^{-1} fue del mismo orden de magnitud que lo reportado por Domke y cols. (2017) para bosques en los Estados Unidos de América y por Zimmermann y cols. (2010) para ecosistemas de alta montaña de los Andes peruanos. Liu y cols. (2011) registraron SOC_{STKi} entre 72.00 y 145.00 t ha^{-1} en áreas forestales de la región de la meseta Loess en China.

Diferentes factores podrían contribuir a determinar o modificar los SOC_{STKs} en el PNLM. La biodiversidad y la estructura forestal son diferentes dependiendo de la altitud, es decir, los bosques mixtos de pinos y encinos o pinos y oyameles se encontraron en las laderas menos empinadas y hasta los 3500 msnm, en cambio, los bosque de pinos se extendieron hasta los 4000 msnm. En la montaña, por encima de 4000 msnm, la disminución del número y de la densidad total de árboles, la reducción del área basal y de la riqueza de especies causaron una reducción significativa de los SOC_{STKs} en concordancia con lo también descrito por Korner (1998). Estas diferentes unidades de paisaje y cambios en la estructura forestal han representado los principales factores de distribución geográfica de los SOC_{STKs} (Guo y Gifford 2002, Vargas y cols. 2008, Chuai y cols. 2014, Mondal y cols. 2017). Los SOC_{STKs} en los suelos de los bosques mixtos de pinos y encinos son generalmente mayores que los registrados en los bosques de pinos; en consecuencia, la conversión de un bosque mixto natural en una plantación de coníferas o la tala selectiva de los encinos podría causar una caída rápida de los SOC_{STKs} (Guo y Gifford 2002). Además, la tala clandestina de los bosques fuertemente impulsada por la industria maderera y la producción de carbón vegetal ha sido intensiva e indiscriminada especialmente en la parte sur del polígono (Puebla) (Arriaga-Cabrera y cols. 2009). Aquí se registraron SOC_{STKs} más bajos que en los bosques de la parte norte del PNLM. La tala clandestina de grandes superficies de bosque reduce o elimina por completo el horizonte O de materia orgánica del suelo, dejando el terreno “desnudo” sin cobertura y sujeto a fenómenos meteorológicos erosivos (García-Pausas y cols. 2007, Zhou y cols. 2008, Dorji y cols. 2014, Zhang y cols. 2015, Mondal y cols. 2017). La quema de la vegetación no deseada en los suelos agrícolas, causa descuido de los campesinos, se extiende a menudo a los bosques circundantes comprometiendo seriamente la estructura forestal y reduciendo

fuertemente la capa de materia orgánica (Arriaga-Cabrera y cols. 2009). Aproximadamente el 50% de las reservas forestales de C se encuentran en el suelo (Pan y cols. 2011, Valtera y Šamonil 2018) y la parte restante en la biomasa forestal viva y muerta. Por lo tanto, estos dos componentes son afectados por la deforestación y los incendios forestales de la misma manera.

También la textura del suelo resulta ser un patrón determinante en la distribución geográfica de los SOC_{STKs}; la fracción de arcilla del suelo acumula más SOC que cualquier otra fracción (Jagadamma y Lal 2010). Los suelos del PNLM son principalmente franco arenosos. Finalmente la orientación de las laderas determina la luz solar, la temperatura, las precipitaciones e indirectamente la estructura de los bosques del PNLM y consecuentemente el tamaño y la distribución de los SOC_{STKs}.

La cumbre de la montaña está cubierta exclusivamente de pastos, aquí los SOC_{STKs} registrados fueron similares a los encontrados por Kopáček y cols. (2006) para unos pastizales alpinos, sin embargo, los SOC_{STKs} en estos pastos de altura fueron considerablemente menores que los reportados en otras investigaciones (Garcia-Pausas y cols. 2007, Montané y cols. 2007, Djukic y cols. 2010). Muy probablemente las diferencias en los SOC_{STKs} encontrados en esta investigación se deben a las condiciones geográficas, ambientales, geológicas y climáticas específicas de este ecosistema montañoso. El suelo poco profundo en la cumbre del PNLM, las laderas empinadas, la erosión hídrica y eólica, y el clima hostil redujeron fuertemente el crecimiento de la vegetación y, por lo tanto, los SOC_{STKs} de esta área.

El SOC en el horizonte A del PNLM disminuyó en el siguiente orden: suelo forestal > suelo de pastizales naturales > suelo agrícola, este resultado coincide con lo descrito en otros estudios como por ejemplo Gurumurthy y cols. (2009) y Saha y cols. (2012). Kocyigit y Demirci (2012) reportaron un $\overline{\text{SOC}}$ de 44.70 g kg⁻¹ en la capa superior del suelo forestal (0-15 cm), de 25.10 g kg⁻¹ en el pastizal y de 14.70 g kg⁻¹ en el suelo agrícola, estos datos son del mismo orden de magnitud que los encontrados en los suelos del PNLM.

Las acciones humanas como la extracción de recursos maderables, la tala clandestina y la deforestación causan la degradación y desaparición del horizonte O de materia orgánica en el PNLM. Consecuentemente la cantidad de SOC retenido en los suelos forestales perturbados o en los suelos agrícolas de esta región se reduce sensiblemente (Reicosky

2016, Stumpf y cols. 2018). Campos y cols. (2014) obtuvieron resultados parecidos en un suelo forestal de una zona específica de Veracruz (México), donde observaron que en el suelo de bosque se retuvo mas SOC que en los suelo agrícolas y en los pastos adyacentes.

8.2. Desempeño de los Métodos de Interpolación

Cada uno de los métodos de interpolación utilizados en este proyecto doctoral describió satisfactoriamente la distribución espacial de los SOC_{STKs} en el suelo superficial (horizonte O + horizonte A) del PNLM. En consecuencia, la densidad y la distribución geográfica de las muestras fueron adecuadas para los propósitos del proyecto y suficientes para redactar mapas temáticos de alta calidad.

La técnica geoestadística OK logró el mejor rendimiento entre los cinco métodos monoparamétricos. Según Zhang y cols. (2011), Mousavifard y cols. (2012) y Bhunia y cols. (2018) el OK y su autocorrelación espacial representan opciones válidas para mapear los patrones ecosistémicos del suelo. En esta investigación, el análisis de la autocorrelación espacial a través de un semivariograma de tipo exponencial indicó una fuerte dependencia espacial entre los SOC_{STKs} georeferenciados, ya que la relación nugget - sill fue de 0.23 y menor del 25% (Cambardella y cols. 1994).

Aunque los resultados de las técnicas CK y OK han sido comparables, el método CK logró la mayor precisión y detalle ya que se utilizaron variables secundarias adicionales como altitud, índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y pendiente del terreno. Entre los métodos probabilísticos el EBK fue el menos eficiente. Según Zare-Mehrjardi y cols. (2010) los métodos probabilísticos (OK y CK) son mas efectivos que los algoritmos determinísticos (IDW y LPI) para mapear la distribución espacial de las características del suelo.

De los tres algoritmos determinísticos utilizados, los mejores resultados se obtuvieron con el método del IDW como también lo describieron Tang y cols. (2017). Sarmadian y cols. (2014) implementaron el método del RBF para mapear el SOC obteniendo buenos resultados, sin embargo, en este proyecto el RBF fue el algoritmo menos eficaz.

8.3. Escenarios Hipotéticos

El área alrededor del volcán La Malinche fue declarado parque nacional por Decreto Presidencial en 1938 (Gaceta Oficial: 6 de octubre 1938). La mayor parte de la montaña estaba caracterizada por bosques, excepto las zonas cercanas a la cumbre. La falta de caminos, senderos y terracerías limitaba la extracción de madera por parte de la población local. Desde entonces, se han construido carreteras, y aunque la mayoría permanece sin firme (superficie de la carretera), algunas conexiones han sido asfaltadas. Esto ha facilitado el acceso al bosque y desafortunadamente ha contribuido a un incremento de acciones ilegales como la tala clandestina y la extracción de productos forestales. También ha desencadenado la deforestación y cambio de uso del suelo con los bosques que han sido convertidos en campos agrícolas que actualmente cubren el 50% del polígono del PNLM (SEMARNAT 2013). El bosque de la parte norte del polígono (Tlaxcala) conserva todavía la mayor parte de su vegetación primaria (pinos y encinos) y también la vegetación arbustiva resulta densa y frondosa, como confirmaron los valores de NDVI aproximadamente de 0.40. Esta área también se caracterizó por los mayores contenidos de SOC (de g kg^{-1} 67.32 a 100.81 g kg^{-1}) y de los SOC_{STKS} (54.22 t ha^{-1} a 196.33 t ha^{-1}). Los valores antes mencionados nos llevan a suponer que en 1938 la reserva total de carbono orgánico del suelo ($\text{T.Stock}_{\text{SOC}}$) en el PNLM era de aproximadamente 4.98 Tg, pero hoy en día resulta solamente de 2.45 Tg. Considerando que los SOC_{STKS} en los suelos de los bosques mixtos de pinos y encinos son generalmente mayores que los registrados en los bosques de pinos y que los cultivos estacionales en el PNLM se encuentran a las altitudes menores en zonas que, muy probablemente, en el pasado estaban dominadas por bosques mixtos y de latifoliadas (SEMARNAT 2013), el $\text{T.Stock}_{\text{SOC}}$ para el año 1938 podría ser todavía mayor respecto a lo calculado de 4.98 Tg. La total conversión de los bosques de esta región en campos agrícolas produciría un daño ambiental enorme y el $\text{T.Stock}_{\text{SOC}}$ caería hasta solo 0.52 Tg C.

Recientemente, las autoridades nacionales han promovido un programa de conservación protección y restauración del PNLM (SEMARNAT 2013) con los objetivos de detener la conversión de los bosques a suelo agrícolas, contrarrestar la tala ilegal y los incendios forestales. Las acciones de reforestación y regeneración forestal contribuirán a restablecer las condiciones ecológicas previas a las modificaciones causadas por las actividades humanas y parar el declive del $\text{T.Stock}_{\text{SOC}}$.

Los bosques templados ocupan actualmente el 16% del territorio mexicano y representan el segundo bioma más grande del país (CONABIO <https://www.biodiversidad.gob.mx>, Guzmán-Mendoza y cols. 2014). La mayoría de estos ecosistemas caracterizan a la región del Eje Neovolcánico (CONABIO <https://www.biodiversidad.gob.mx>). En esta zona geográfica se encuentran presentes otros parques nacionales y áreas de protección de flora y fauna, además del PNLN, por ejemplo, Iztaccíhuatl – Popocatepetl (398 km²), Pico de Orizaba (197 km²), Cofre de Perote (117 km²) y Nevado de Toluca (467 km²) (CONANP <http://sig.conanp.gob.mx>). La deforestación y el cambio de uso del suelo son las principales razones de la degradación de estos ecosistemas de alta montaña. Cualquier programa de conservación y protección de los bosques templados debería tratar de abordar factores económicos, políticos, sociales y culturales (Fuentes y Ramírez 2016). Considerando las extensiones de estos ecosistemas, programas exitosos y acciones de reforestación - regeneración forestal sustentables podrían ser muy eficaces y contribuirían a aumentar significativamente los SOC_{STKs}.

Los resultados de este proyecto doctoral podrán utilizarse como datos y cartografía básica para implementar estrategias de reforestación de las áreas más deterioradas del PNLN y en última instancia aumentar el T.Stock_{SOC} en el marco del programa del gobierno mexicano "Sembrando Vida" del (Gobierno de México <https://www.gob.mx>). El programa tiene el objetivo de contribuir al bienestar social de las personas en las zonas rurales, aumentar su participación efectiva en proyectos integrados de desarrollo rural y aumentar los SOC_{STKs} como respuestas locales al cambio climático global.

Las especies nativas, en nuestro caso específico pino y pinos encinos, tienen características prometedoras para emplearse en programas de restauración y reforestación "multipropósito" en el PNLN, y resultan importantes por los servicios que prestan al ambiente como protección de la erosión hídrica y eólica, y la preservación de otras especies de flora y fauna (SEMARNAT 2013).

Aunque la validación cruzada confirmó la alta eficiencia de los mapas de distribución espacial de los SOC_{STKs} en el suelo superficial del PNLN, el siguiente paso será desarrollar un algoritmo basado en imágenes satelitales Landsat 8 OLI e índices de percepción remota para mejorar aún más el grado de detalle y la precisión de los mapas.

9. CONCLUSIONES

La distribución geográfica de las reservas de carbono orgánico del suelo (SOC_{STKs}) en el Parque Nacional La Malinche (PNLM) está controlada por diferentes factores, pero el uso del suelo, derivado de la conversión de las forestas en suelos agrícolas, es lo que más la afecta y determina. El descenso de los SOC_{STKs} está impulsado principalmente por la conversión de bosques y pastizales en campos agrícolas y por la tala clandestina. La reserva total ecosistémica de carbono orgánico del suelo ($T.Stock_{SOC}$) en el suelo superficial del PNLM era de aproximadamente 4.98 Tg en el 1938; hoy en día el $T.Stock_{SOC}$ apenas alcanza los 2.45 Tg.

En esta investigación, el contenido de carbono orgánico del suelo (SOC) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (indicador de biomasa) se correlacionaron positivamente. Por esta razón, es posible asumir que a una caída de carbono (C) de la biomasa vegetal corresponde una disminución en los SOC_{STKs} de igual tamaño. La conversión total de los bosques de esta región en campos agrícolas sería causante de un importante problema ambiental a escala nacional y el $T.Stock_{SOC}$ se reduciría a tan solo 0.52 Tg.

La cartografía temática producida en este estudio de tesis doctoral puede representar una base cartográfica adecuada para diseñar y desarrollar proyectos de restauración y monitoreo de esta área, con el objetivo de aumentar o por lo menos preservar los SOC_{STKs} en el PNLM.

10. PERSPECTIVAS

Aunque la validación cruzada confirmó la alta eficiencia de los mapas de distribución espacial de las reservas de carbono orgánico del suelo (SOC_{STKs}) en el Parque Nacional La Malinche (PNLM), el siguiente paso será desarrollar un método de interpolación multiparamétrico basado en imágenes satelitales Landsat 8 OLI e índices de percepción remota para mejorar aún más el grado de detalle y la precisión de los mapas.

Un futuro objetivo también será cuantificar el carbono de la biomasa mediante un esquema de parcelas, subparcelas y miniparcelas según lo propuesto por Vicharnakorn y cols. (2014), identificando a través de percepción remota los sitios más deteriorados por el cambio de uso del suelo y la tala clandestina.

11. REFERENCIAS

- Acosta M., Etchevers JD. 2002.** Distribución de carbono orgánico en el perfil del suelo, en diferentes sistemas de bosques de la Sierra Norte de Oaxaca. In Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Torreón, Coahuila, México (CD-ROM).
- Agrawal OP, Rao KVGK, Chauhan HS, Khandelwal, MK. 1995.** Geostatistical analysis of soil salinity improvement with subsurface drainage system. *Transactions of the ASAE* **38**: 1427-1433 DOI:10.13031/2013.27967.
- Arriaga-Cabrera L, Aguilar V, Espinoza JM, Galindo C, Herrmann H, Santana E, Graf-Montero S, Pisanty I, Rosenzweig L. 2009.** Regiones prioritarias y planeación para la conservación de la biodiversidad. *Capital Natural de México* **2**: 433-457.
- Bellamy PH, Loveland PJ, Bradley RI, Lark RM, Kirk GJD. 2005.** Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003. *Nature* **437**: 245-248 DOI:10.3410/f.1028579.343447.
- Bhunias GS, Shit PK, Pourghasemi HR. 2019.** Soil organic carbon mapping using remote sensing techniques and multivariate regression model. *Geocarto International* **34(2)**: 215-226 DOI:10.1080/10106049.2017.1381179.
- Bhunias GS, Shit PK, Maiti R. 2018.** Comparison of GIS-based interpolation methods for spatial distribution of soil organic carbon (SOC). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* **17**: 114-116 DOI:10.1016/j.jssas.2016.02.001.
- Bouyoucos GJ. 1962.** Hydrometer method for making particle size analysis of soil. *Agronomy Journal* **54**: 464-465 DOI:10.2134/agronj1962.00021962005400050028x.
- Bojko O, Kabala C. 2017.** Organic carbon pools in mountain soils - Sources of variability and predicted changes in relation to climate and land use changes. *CATENA* **149**: 209-220 DOI: 10.1016/j.catena.2016.09.022.
- Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin, TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE. 1994.** Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal* **58**: 1501-1511 DOI:10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x.
- Campos A, Aguilar G, Landgrave R. 2014.** Soil organic carbon stocks in Veracruz State (Mexico) estimated using the 1: 250,000 soil database of INEGI: biophysical

- contributions. *Journal of Soils and Sediments* **14**: 860-871 DOI:10.1007/s11368-014-0851-2.
- Chabala LM, Mulolwa A, Lungu O. 2017.** Application of ordinary kriging in mapping soil organic carbon in Zambia. *Pedosphere* **27**: 338-343
DOI:10.1016/S1002-0160(17)60321-7.
- Chang KT. 2015.** Introduction to geographic information systems, seventh ed. McGraw Hill Education.
- Chen C, Hu K, Li H, Yun A, Li B. 2015.** Three-dimensional mapping of soil organic carbon by combining kriging method with profile depth function. *PloS One* **10**: e0129038 DOI:10.1371/journal.pone.0129038.
- Chuai X, Huang X, Wang W, Wu C, Zhao R. 2014.** Spatial simulation of land use based on terrestrial ecosystem carbon storage in coastal Jiangsu, China. *Scientific Reports* **4**: 5667 DOI:10.1038/srep05667.
- Clay DE, Shanahan JF. 2011.** GIS Applications in Agriculture, Volume Two: Nutrient Management for Energy Efficiency, first ed. CRC Press.
- Dabney SM, Wilson GV, McGregor KC, Foster G.R. 2004.** History, residue, and tillage effects on erosion of loessial soil. *Transactions of the ASAE* **47**: 767-775
DOI:10.13031/2013.16108.
- Ding M, Lanhui L, Zhang Y, Sun X, Liu L, Gao J, Wang Z, Li Y. 2015.** Start of vegetation growing season on the Tibetan Plateau inferred from multiple methods based on GIMMS and SPOT NDVI data. *Journal of Geographical Sciences* **25**: 131-148
DOI:10.1007/s11442-015-1158-y.
- Djukic I, Zehetner F, Tatzber M, Gerzabek MH. 2010.** Soil organic matter stocks and characteristics along an Alpine elevation gradient. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **173**: 30-38 DOI:10.1002/jpln.200900027.
- Dodo MK. 2014.** Examining the potential impacts of climate change on international security: EU-Africa partnership on climate change. *SpringerPlus* **3**: 194
DOI:10.1186/2193-1801-3-194.
- Domke GM, Perry CH, Walters BF, Nave LE, Woodall CW, Swanston CW. 2017.** Toward inventory-based estimates of soil organic carbon in forests of the United States. *Ecological Applications* **27**: 1223-1235 DOI:10.1002/eap.1516.

- Dorji T, Odeh IO, Field DJ. 2014.** Vertical distribution of soil organic carbon density in relation to land use/cover, altitude and slope aspect in the eastern Himalayas. *Land* **3**: 1232-1250 DOI:10.3390/land3041232.
- Du Z, Ren T, Hu C. 2010.** Tillage and residue removal effects on soil carbon and nitrogen storage in the North China Plain. *Soil Science Society of America Journal* **74**: 196-202 DOI:10.2136/sssaj2009.0048.
- ESRI Inc. 2001.** Using analytic tools when generating surfaces. In: Geostatistical Analyst Extension. Redlands, CA:ESRI Inc.
- FAO. 2008.** Climate change and food security: a framework document. <http://www.fao.org/docrep/pdf/010/k2595e/k2595e00.pdf>.
- FAO. 2018.** Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems – Guidelines for assessment (Draft for public review). Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership. FAO, Rome, Italy.
- Feulner G. 2017.** Global Challenges: Climate Change. *Global Challenges* **1**: 5-6 DOI:10.1002/gch2.1003.
- Fuentes JCC, Ramírez AV. 2016.** Estudio legal: Facultades y responsabilidades del manejo forestal y del suelo ante REDD+ en México (Vol. 150). CIFOR DOI:10.17528/cifor/006024.
- Garcia-Pausas J, Casals P, Camarero L, Huguet C, Sebastia MT, Thompson R, Romanya J. 2007.** Soil organic carbon storage in mountain grasslands of the Pyrenees: effects of climate and topography. *Biogeochemistry* **82**: 279-289 DOI:10.1007/s10533-007-9071-9.
- Gerber PJ, Steinfeld H, Henderson B, Mottet A, Opio C, Dijkman J, Falcucci A, Tempio G. 2013.** Tackling climate change through livestock - A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. <http://www.fao.org/3/a-i3437e.pdf>.
- Gobiet A, Kotlarski S, Beniston M, Heinrich G, Rajczak J, Stoffel M. 2014.** 21st century climate change in the European Alps—a review. *Science of the Total Environment* **493**: 1138-1151 DOI:10.1016/j.scitotenv.2013.07.050.
- Göl C, Bulut S, Bolat F. 2017.** Comparison of different interpolation methods for spatial distribution of soil organic carbon and some soil properties in the Black Sea backward region of Turkey. *Journal of African Earth Sciences* **134**: 85-91

DOI:10.1016/j.jafrearsci.2017.06.014.

- Guo LB, Gifford RM. 2002.** Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology* **8**: 345-360 DOI:10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x.
- Gurumurthy KT, Kumar MK, Prakasha HC. 2009.** Changes in physico chemical properties of soils under different land use systems. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences* **22**: 1107-1109.
- Guzmán-Mendoza R, Zavala-Hurtado JA, Castaño-Meneses G, León-Cortés JL. 2014.** Comparación de la mirmecofauna en un gradiente de reforestación en bosques templados del centro occidente de México. *Madera y Bosques* **20(1)**: 71-83.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).**
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continuoelevaciones.aspx>(accessed 25 enero 2018).
- Isaaks EH, Srivastava RM. 1989.** An introduction to applied geostatistics, first ed. *Oxford University Press*.
- IUSS Working Group. 2015.** World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports, (106).
<http://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf>.
- Jagadamma S, Lal R. 2010.** Distribution of organic carbon in physical fractions of soils as affected by agricultural management. *Biology and Fertility of Soils* **46(6)**: 543-554
DOI:10.1007/s00374-010-0459-7.
- Jeelani J, Kirmani NA, Sofi JA, Mir SA, Wani JA, Rasool R, Sadat S. 2017.** An overview of spatial variability of soil microbiological properties using geostatistics. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* **6**: 1132-1145
DOI:10.20546/ijcmas.2017.604.140.
- Johnston K, Ver Hoef JM, Krivoruchko K, Lucas N. 2001.** Using ArcGIS geostatistical analyst. Esri, Redlands, CA, USA.
- Karydas CG, Gitas IZ, Koutsogiannaki E, Lydakis-Simantiris N, Silleos GN. 2009.** Evaluation of spatial interpolation techniques for mapping agricultural topsoil properties in Crete. *EARSeL eProceedings* **8**: 26-39.

- Kocyigit R, Demirci S. 2012.** Long-term changes of aggregate-associated and labile soil organic carbon and nitrogen after conversion from forest to grassland and cropland in northern Turkey. *Land Degradation & Development* **23**: 475-482
DOI:10.1002/ldr.1092.
- Kopáček J, Kaňa J, Šantrůčková H. 2006.** Pools and composition of soils in the alpine zone of the Tatra Mountains. *Biologia* **61**: S35-S49 DOI:10.2478/s11756-006-0118-5.
- Korner C. 1998.** A re-assessment of high elevation of tree line positions and their explanations. *Oecologia* **115**: 445–459 DOI:10.1007/s004420050540.
- Krivoruchko K. 2012.** Empirical Bayesian Kriging. Esri, Redlands, CA, USA.
<http://www.esri.com/news/arcuser/1012/files/ebk.pdf>.
- Krivoruchko K, Butler K. 2013.** Unequal Probability-Based Spatial Mapping. Esri, Redlands, CA, USA.
<http://www.esri.com/esri-news/arcuser/spring-2013/unequal-probability-based-spatial-sampling>.
- Kumar S, Lal R, Liu D, Rafiq R. 2013.** Estimating the spatial distribution of organic carbon density for the soils of Ohio, USA. *Journal of Geographical Sciences* **23(2)**: 280-296 DOI:10.1007/s11442-013-1010-1.
- Lal R. 2004.** Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* **304**: 1623-1627 DOI:10.1126/science.1097396.
- Lal R. 2008.** Carbon sequestration *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* **363**: 815-830 DOI:10.1098/rstb.2007.2185.
- Liu L, Wang H, Dai W, Lei X, Yang X, Li X. 2014.** Spatial variability of soil organic carbon in the forestlands of northeast China. *Journal of Forestry Research* **25**: 867-876
DOI:10.1007/s11676-014-0533-3.
- Liu Z, Shao MA, Wang Y. 2011.** Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **142**: 184-194 DOI:10.1016/j.agee.2011.05.002.
- Losser T, Li L, Piltner R. 2014.** A spatiotemporal interpolation method using radial basis functions for geospatiotemporal big data. In Computing for Geospatial Research and Application (COM. Geo), 2014 Fifth International Conference on (pp. 17-24). IEEE. DOI:10.1109/COM.Geo.2014.15.

- Masera, OR, Ordóñez MJ, Dirzo R. 1997.** Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic change* **35(3)**: 265-295.
- Mondal A, Khare D, Kundu S, Mondal S, Mukherjee S, Mukhopadhyay A. 2017.** Spatial soil organic carbon (SOC) prediction by regression kriging using remote sensing data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* **20**: 61-70
DOI:10.1016/j.ejrs.2016.06.004.
- Montané F, Rovira P, Casals P. 2007.** Shrub encroachment into mesic mountain grasslands in the Iberian peninsula: effects of plant quality and temperature on soil C and N stocks. *Global Biogeochemical Cycles* **21** DOI:10.1029/2006GB002853.
- Motsara MR, Roy RN. 2008.** Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis (Vol. 19). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Mousavifard SM, Momtaz H, Sepehr E, Davatgar N, Sadaghiani MHR. 2012.** Determining and mapping some soil physico-chemical properties using geostatistical and GIS techniques in the Naqade region, Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science* **59**: 1573-1589 DOI:10.1080/03650340.2012.74055.
- Moussadek R, Mrabet R, Dahan R, Zouahri A, El Mourid M, Ranst EV. 2014.** Tillage system affects soil organic carbon storage and quality in Central Morocco. *Applied and Environmental Soil Science, 2014* **654796** DOI:10.1155/2014/654796.
- Osei AK, Kimaro AA, Peak D, Gillespie AW, Van Rees KCJ. 2018.** Soil carbon stocks in planted woodlots and Ngitili systems in Shinyanga, Tanzania. *Agroforestry Systems* **92(2)**: 251-262 DOI:10.1007/s10457-016-0028-7.
- Pan JJ, Zhang TL, Zhao QG. 2005.** Dynamics of soil erosion in Xingguo County, China, determined using remote sensing and GIS. *Pedosphere* **15**: 356-362.
- Pan Y, Birdsey RA, Fang J, Houghton R, Kauppi PE, Kurz WA, Phillips OL, Shvidenko A, Lewis SL, Canadell JG, Ciais P, Jackson RB, Pacala SW, McGuire AD, Piao S, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. 2011.** A large and persistent carbon sink
- Reicosky DC. 2016.** Long-term effect of moldboard plowing on tillage-induced CO₂ loss. *Agricultural practices and policies for carbon sequestration in soil*. CRC Press 111-122.
- Rial M, Cortizas AM, Rodríguez-Lado L. 2017.** Understanding the spatial distribution of factors controlling topsoil organic carbon content in European soils. *Science of the Total Environment* **609**: 1411-1422 DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.08.012.

- Roose EJ, Lal R, Feller C, Barthes B, Stewart BA. 2005.** Soil erosion and carbon dynamics, first ed. CRC Press, Boca Raton.
- Saha R, Chaudhary RS, Somasundaram J. 2012.** Soil health management under hill agroecosystem of North East India. *Applied and Environmental Soil Science*, 2012 **696174** DOI:10.1155/2012/696174.
- Sarmadian F, Ali K, Antonia O, Ghavamoddin Z, Hossein J. 2014.** Mapping of spatial variability of soil organic carbon based on radial basis functions method. *ProEnvironment* **7**: 3-9.
- Scully P, Franklin J, Chadwick OA, McArthur D. 2003.** Predictive soil mapping: a review. *Progress in Physical Geography* **27**: 171-197
DOI:10.1191/0309133303pp366ra.
- Segnini A, Posadas A, Quiroz R, Milori DMBP, Vaz CMP, Martin-Neto L. 2011.** Soil carbon stocks and stability across an altitudinal gradient in southern Peru. *Journal of Soil and Water Conservation* **66**: 213-220 DOI:10.2489/jswc.66.4.213.
- Segura-Castruita MA, Sánchez-Guzmán P, Ortiz-Solorio C.A, Gutiérrez-Castorena M. 2005.** Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana* **23(1)**: 21-28.
- SEMARNAT. 2013.** Programa de Manejo Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl D. R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Shah S, Venkatramanan V. 2009.** Agriculture Management practices in relation to soil carbon sequestration: A review. *Agricultural Reviews* **30**: 301-306.
- Signor D, Deon MDI, Camargo PBD, Cerri CEP. 2018.** Quantity and quality of soil organic matter as a sustainability index under different land uses in Eastern Amazon. *Scientia Agricola* **75**: 225-232 DOI:10.1590/1678-992x-2016-0089.
- Simbahan GC, Dobermann A, Goovaerts P, Ping J, Haddix M L. 2006.** Fine-resolution mapping of soil organic carbon based on multivariate secondary data. *Geoderma* **132(3-4)**: 471-489. DOI:10.1016/j.geoderma.2005.07.001
- Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar TD, Castel V, de Haan C. 2006.** Livestock's long shadow: environmental issues and options. Food & Agriculture Org.
<http://www.fao.org/docrep/010/a0701e/a0701e00.HTM>.
- Stocker T. 2014.** Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate

Change, first ed. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Stumpf F, Keller A, Schmidt K, Mayr A, Gubler A, Schaepman M. 2018.** Spatio-temporal land use dynamics and soil organic carbon in Swiss agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **258**: 129-142
DOI:10.1016/j.agee.2018.02.012.
- Tang X, Xia M, Pérez-Cruzado C, Guan F, Fan S. 2017.** Spatial distribution of soil organic carbon stock in Moso bamboo forests in subtropical China. *Scientific reports* **7**: 42640 DOI:10.1038/srep42640.
- Teng M, Zeng L, Xiao W, Huang Z, Zhou Z, Yan Z, Wang P. 2017.** Spatial variability of soil organic carbon in Three Gorges Reservoir area, China. *Science of the Total Environment* **599**: 1308-1316 DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.05.085.
- Tucker CJ. 1979.** Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* **8**: 127-150
DOI:10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- Tucker CJ, Pinzon JE, Brown ME, Slayback DA, Pak EW, Mahoney R, Vermote EF, El Saleous N. 2005.** An extended AVHRR 8-km NDVI data set compatible with MODIS and SPOT Vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing* **26**: 4485-4498 DOI:10.1080/01431160500168686.
- Tucker CJ, Sellers PJ. 1986.** Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing* **7**: 1395-1416
DOI:10.1080/01431168608948944.
- USGS Global Visualization Viewer (GloVis).**
<https://glovis.usgs.gov> (accessed 05 enero 2019).
- Valtera M, Šamonil P. 2018.** Soil organic carbon stocks and related soil properties in a primary *Picea abies* (L.) Karst. volcanic-mountain forest. *CATENA* **165**: 217-227
DOI:10.1016/j.catena.2018.01.034.
- Vargas R, Allen MF, Allen EB. 2008.** Biomass and carbon accumulation in a fire chronosequence of a seasonally dry tropical forest. *Global Change Biology* **14**: 109-124
DOI:10.1111/j.1365-2486.2007.01462.x.
- Vauclin M, Vieira SR, Vachaud G, Nielsen DR. 1983.** The use of cokriging with limited field soil observations. *Soil Science Society of America Journal* **47**: 175-184

DOI:10.2136/sssaj1983.03615995004700020001x.

- Vicharnakorn P, Shrestha R, Nagai M, Salam A, Kiratiprayoon S. (2014).** Carbon stock assessment using remote sensing and forest inventory data in Savannakhet, Lao PDR. *Remote Sensing* **6(6)**: 5452-5479 DOI:10.3390/rs6065452.
- Wang S, Huang M, Shao X, Mickler RA, Li K, Ji J. 2004.** Vertical distribution of soil organic carbon in China. *Environmental Management* **33**: S200-S209 DOI:10.1007/s00267-003-9130-5.
- Wang YQ, Shao MA. 2013.** Spatial variability of soil physical properties in a region of the Loess Plateau of PR China subject to wind and water erosion. *Land Degradation & Development* **24**: 296-304 DOI:10.1002/ldr.1128.
- Watson DF, Philip GM. 1985.** A refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geo-processing* **2**: 315-327.
- Wei JB, Xiao DN, Zeng H, Fu YK. 2008.** Spatial variability of soil properties in relation to land use and topography in a typical small watershed of the black soil region, northeastern China. *Environmental Geology* **53**: 1663-1672 DOI:10.1007/s00254-007-0773-z.
- West TO, Post WM. 2002.** Soil organic Carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Division S-6—Soil & Water Management & Conservation. Soil Science Society of America Journal* **66**: 1930-1946 DOI:10.3334/CDIAC/tcm.002.
- Wilson BR, Growns, I, Lemon J. 2008.** Land-use effects on soil properties on the north-western slopes of New South Wales: implications for soil condition assessment. *Australian Journal of Soil Research* **46**: 359–367 DOI:10.1071/SR07231.
- Yalçın E. 2005.** Cokriging and its effect on the estimation precision. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* **105**: 223-228.
- Yang Y, Zhu J, Tong X, Wang D. 2009.** Spatial pattern characteristics of soil nutrients at the field scale, in: Li, D., Zhao, C. (Eds.), *Computer and Computing Technologies in Agriculture*. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 125-134 DOI:10.1007/978-1-4419-0209-2_14.
- Zare-mehrjardi M, Taghizadeh-Mehrjardi R, Akbarzadeh A. 2010.** Evaluation of geostatistical techniques for mapping spatial distribution of soil pH, salinity and plant

cover affected by environmental factors in Southern Iran. *Notulae Scientia Biologicae* **2**: 92–103 DOI:10.15835/nsb244997.

Zhang H, Zhuang S, Qian H, Wang F, Ji H. 2015. Spatial variability of the topsoil organic carbon in the Moso bamboo forests of southern China in association with soil properties. *PLoS One* **10**: e0119175 DOI:10.1371/journal.pone.0119175.

Zhang P, Shao M.A. 2014. Spatial variability and stocks of soil organic carbon in the Gobi desert of Northwestern China. *PLoS One* **9(4)**: e93584 DOI:1371/journal.pone.0093584.

Zhang S, Huang Y, Shen C, Ye H, Du Y. 2012. Spatial prediction of soil organic matter using terrain indices and categorical variables as auxiliary information. *Geoderma* **171-172**: 35-43 DOI:10.1016/j.geoderma.2011.07.012.

Zhang Z, Yu D, Shi X, Weindorf DC, Sun Y, Wang H, Zhao Y. 2011. Effects of prediction methods for detecting the temporal evolution of soil organic carbon in the Hilly Red Soil Region, China. *Environmental Earth Sciences* **64**: 319–328 DOI:10.1007/s12665-010-0849-z.

Zhao JX, Dai FQ, He SJ, Zhang Q, Liu GC. 2017. Spatiotemporal variation of soil organic carbon in the cultivated soil layer of dry land in the South-Western Yunnan Plateau, China. *Journal of Mountain Science* **14**: 2484-2497 DOI:10.1007/s11629-016-4314-7.

Zhou P, Luukkanen O, Tokola T, Nieminen J. 2008. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *CATENA* **75**: 319-325 DOI:10.1016/j.catena.2008.07.010.

Zimmermann M, Meir P, Silman MR, Fedders A, Gibbon A, Malhi Y, Urrego DH, Bush MB, Feeley KJ, Garcia KC, Dargie GC, Farfan WR, Goetz BP, Johnson WT, Kline KM, Modi AT, Rurau NMQ, Staudt BT, Zamora F. 2010. No differences in soil carbon stocks across the tree line in the Peruvian Andes. *Ecosystems* **13**: 62-74 DOI 10.1007/s10021-009-9300-2.

12. ACRÓNIMOS y ABREVIATURAS

BRF: función de base radial

C: carbono

CEM 3.0: continuo de elevaciones mexicano 3.0

CK: cokriging

d: espesor del horizonte O

DEM: modelo de elevación digital

EBK: kriging bayesiano empírico

GHG: gases de efecto invernadero

GIS: sistema de información geográfica

IDW: distancia inversa ponderada

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

LPI: interpolación polinómica local

ME: error medio estandarizado

MRE: error relativo medio

NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada

OK: kriging ordinario

PNLM: parque nacional La Malinche

RMSE: error cuadrático medio

R^2 : coeficiente de determinación

SOC: carbono orgánico del suelo

SOC_{STK_i} : reserva de carbono orgánico del suelo de la muestra i-ésima

SOC_{STK_s} : reservas (stocks) de carbono orgánico del suelo

$T.Stock_{SOC}$: reserva total de carbono orgánico del suelo