

Método de mapeo digital para una aproximación a la interpretación de la fertilidad de suelos y su relación con el rendimiento de maíz (*Zea mays*) en el municipio de Comacarán, San Miguel, El Salvador

Torres-Gámez LD

Estudiante tesista

Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente
Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador.

Correo electrónico: ld-gamez@hotmail.es

Vásquez-Méndez FJ

Estudiante tesista

Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente
Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador.

Correo electrónico: Fernandov2308@gmail.com

López-Landaverde RA

Docente Director

Departamento de Recursos Naturales
Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador.

Correo electrónico: agrorey.ues@gmail.com

Argueta- Platero AA

Docente Director

Escuela de Posgrado y Educación Continua
Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador.

Correo electrónico: abelalexeiap@gmail.com

Argueta-Portillo Q

Docente Director externo

Catholic Relief Services .

Correo electrónico: quirino.argueta@crs.org

Resumen

La investigación se realizó de junio de 2016 a mayo de 2017 en los cantones El Platanarillo y El Colorado pertenecientes al municipio Comacarán, departamento de San Miguel, El Salvador. Se generaron mapas de propiedades físicas y químicas, fertilidad y rendimiento del cultivo de maíz. Se utilizaron las bases de datos siguientes: mapa de uso actual, mapa de geología, el modelo de elevación digital, mapa de red vial, mapa de departamentos, cantones y municipios de El Salvador.

Al inicio de la investigación se utilizó la herramienta del Hipercono Latino Condicionado (LHS), para determinar el número de puntos de muestreo, los cuales se generaron a partir del modelo de elevación digital (MDE) y mapas de atributos de terreno, como lo son el índice de posición topográfico (TPI), el índice de humedad topográfico (TWI), y a partir de estos se generó un mapa de dificultad de muestreo de suelos utilizando la red vial de la zona.

Se obtuvieron 6 sitios de muestreo, el muestreo de suelo se llevó a cabo con barreno, pala, bolsas plásticas, palines, cubetas, tomando 5 submuestras por cada sitio, formando una muestra compuesta, posteriormente las muestras fueron llevadas al laboratorio del Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA) en el cual se hizo un análisis completo de laboratorio. Los parámetros fisicoquímicos obtenidos se utilizaron junto con las herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para finalmente elaborar mapas de propiedades, con los datos de rendimiento se procedió a realizar el mapa de rendimiento del cultivo del maíz, además de las recomendaciones del manejo de fertilidad de los suelos. Luego de tener los mapas de propiedades de suelo, se elaboró el mapa de fertilidad en el cual se obtuvo que un 29.82 % del área se considera que tiene un nivel bajo de fertilidad de suelo y un 39.04% un nivel alto fertilidad de suelo, para los cantones el Colorado y el Platanarillo, municipio de Comacarán. Además, se proporcionan recomendaciones de manejo de fertilidad para cada finca.

Palabras clave: Mapeo de la fertilidad del suelo, Hipercono Latino Condicionado, Análisis de suelo.

Abstract

The research was carried out from June 2016 to May 2017 in the cantons of Platanarillo and Colorado belonging to the Municipality of Comacarán of the Department of San Miguel. Physical and chemical properties maps, fertility and corn yield were generated. The following databases were used: current use map, geology map, digital elevation model, road network map, map of departments, cantons and municipalities of El Salvador.

At the beginning of the research, the Latin Condition Hypercube (LHS), tool was used to determine the number of sampling points, which were generated from the digital elevation model (MDE) and terrain attribute maps, such as the Topographic Position index (TPI), the topographic Wetness index (TWI), and from these a cost map was generated using the road network of the area.

Six sampling points were obtained, soil sampling was carried out with borehole, shovel, plastic bags, pallets, buckets, taking 5 subsamples for each point and forming a composite sample, later the samples were taken to the laboratory of Centro Nacional de Agricultural

and Forestry Technology (CENTA) in which a complete laboratory analysis was done. The physicochemical parameters obtained were used together with the tools of Geographic Information Systems (GIS) to finally elaborate property maps, with the performance data the maize crop performance map was carried out, in addition to the recommendations of the management of fertility of soils. After having the soil properties maps, the fertility map was elaborated in which it was obtained that 29.82% of the area is considered to have a low level and 39.04% a high level,

for the cantons of the Colorado and the Platanarillo, of the municipality of Comacarán

Key words: Soil fertility mapping, Latin Conditional Hypercube, Soil analysis.

Introducción

La fertilidad de los suelos durante los últimos años ha disminuido considerablemente debido a los procesos de erosión y a la indiscriminada utilización de productos químicos sintéticos, estos procesos modifican sus propiedades físicas, químicas y biológicas que conllevan a su deterioro, además los suelos se han visto afectados debido a las prácticas tradicionales del productor con quema y siembra de cultivos limpios en terrenos con laderas pronunciadas que inducen a la erosión superficial de las tierras (Andrades y Martínez 2010). El rendimiento de los cultivos está estrechamente relacionado con los niveles de fertilidad de los suelos agrícolas, que es donde las plantas obtienen los elementos minerales que requieren para su nutrición.

En El Salvador al recurso suelo no se le da la relevancia que merece, a pesar de ser un recurso natural no renovable, la erosión se ha convertido en los últimos años en el principal problema en El Salvador, por ello la fertilidad ha disminuido considerablemente y los suelos se vuelven ácidos. Este recurso es uno de los principales medios que tienen los agricultores para subsistir, generalmente los productores que se dedican a la siembra de granos básicos no cuentan con análisis de fertilidad de sus suelos, los cuales desarrollan procesos de fertilización empíricos, aplicando muchas veces dosis y productos que no se requieren, ocasionando contaminación en el suelo o inclusive en los recursos hídricos (MARN 2016).

La cartografía digital de suelos por medio de los sistemas de información geográfica es de vital importancia en la agricultura, permitiendo generar visiones complejas del terreno, para tomar decisiones como la aplicación de fertilizantes o determinar las causas de la variabilidad, por medio de estos sistemas cada variable medida estará localizada y de esta forma se tiene la posibilidad de estudiarlo y observar los resultados (Rosas y Arribillaga s.f).

Algunos estudios demuestran que se puede realizar un mapeo de suelos y estimar los valores de nutrientes presentes en el suelo, desarrollando a través de modelos estadísticos, mapas que demuestran los valores para las distintas zonas geográficas de un territorio (Prisma 2015), con los cuales se utilizan posteriormente para que técnicos y productores puedan estimar en base a las demandas del cultivo, las dosis más precisas de fertilizante o enmiendas que se requieren para obtener óptimos rendimientos.

En El Salvador la agricultura de precisión está siendo aplicada en alguna medida para cultivos extensivos como la caña de azúcar, sin embargo, para los pequeños productores, que cultivan en suelos de laderas y de baja

fertilidad, es difícil que las instituciones, técnicos o los mismos productores cuenten con herramientas que les permita hacer un uso adecuado de los recursos de producción. Generar investigación sobre el mapeo de fertilidad de suelos, permitirá realizar recomendaciones para el manejo de la fertilidad de los suelos, que los técnicos y los productores pueden utilizar, con esto se disminuirán los costos debido al uso excesivo de fertilizantes que son aplicados sin análisis técnico entre la fertilidad y los requerimientos de los cultivos, una buena fertilización contribuye a obtener mejores rendimientos en el cultivo de maíz, el cual es parte importante de la dieta de los salvadoreños y su demanda se encuentra en aumento año con año (Argueta Portillo¹ 2015).

El objetivo del estudio fue generar mapas de propiedades físicas y químicas que permitan describir el comportamiento de la fertilidad de los suelos, con análisis se desarrollaron a partir de la selección de sitios de muestreo seleccionados en base a la metodología del Hipercubo Latino condicional, el cual considera la geología y la topografía local, así como la proximidad y accesibilidad al territorio, además se utilizaron los softwares Arc Map 10.4, QGIS 2.12 Lyon y soLIM versión 2.1.0. Después de identificar los puntos de muestreo y obtener las muestras, se llevaron al laboratorio de suelos de CENTA. A partir de los resultados físicos y químicos reportados, se generaron recomendaciones técnicas para el manejo de la fertilidad, basados en las demandas de los cultivos según la guía técnica del maíz de CENTA, con el apoyo las herramientas SIG se llegó a obtener un mapa que representa la fertilidad actual del suelo. Dicho mapa contiene la información de las propiedades físicas, químicas y fisiográficas, mediante estas herramientas los técnicos tienen un apoyo en la toma de decisiones en campo, para mejorar el manejo de los cultivos.

Materiales y métodos

Ubicación de la investigación

La investigación se realizó en los cantones El Platanerillo y El Colorado pertenecientes al municipio Comacarán, departamento de San Miguel, El Salvador, con coordenadas Latitud Norte 13°32' y Longitud Oeste 88°04' (Fig. 1), con un área total de 22.74 km², una altura que oscila entre los 200 msnm y 400 msnm, la zona piloto está limitada al oeste y este por la cuenca del río Grande de San Miguel, las condiciones climáticas de la zona son las siguientes: Temperatura promedio anual de 32.5 °C, humedad relativa 65 % y precipitación promedio anual de 1300 mm (MARN, 2015).

¹ Argueta Portillo, Q. 2015. Microcuenca EL Tamarindo (entrevista). San Salvador, SV. Catholic Relief Services.

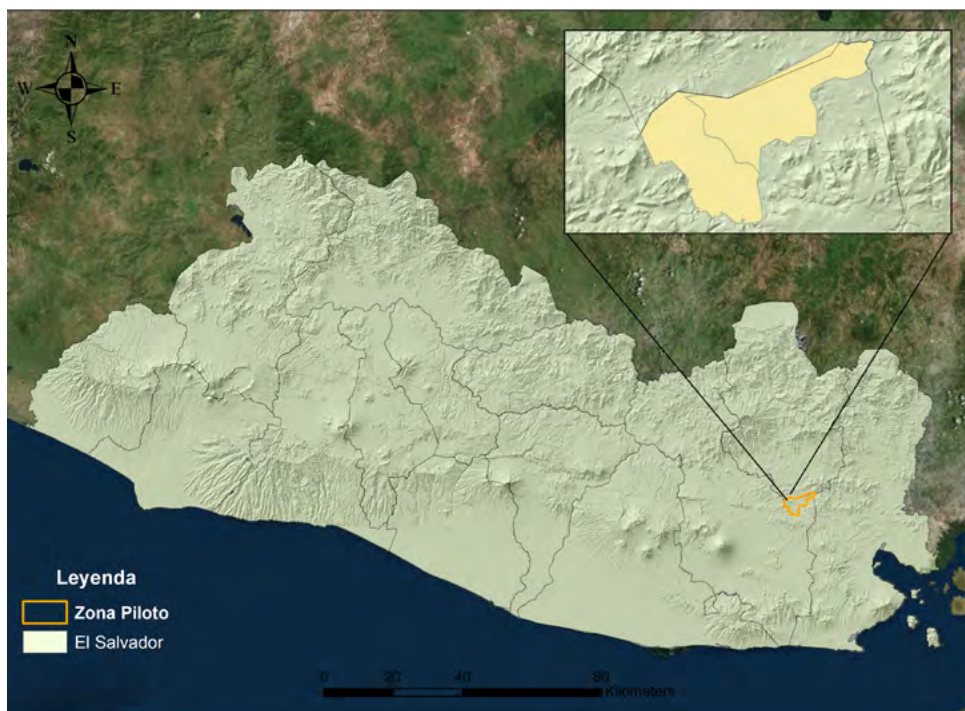


Figura 1. Ubicación de la zona piloto, en los cantones El Platanarillo y El Colorado, del municipio Comacarán, departamento de San Miguel.

Descripción del estudio

El estudio fue de carácter descriptivo el cual se dividió en 3 partes: la primera parte consistió en el análisis de las características y condiciones del área de estudio por medio de herramientas informáticas, desarrollándose en el laboratorio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) del edificio del Instituto de Investigaciones Agroalimentarias, Ambientales y Escuela de Posgrado y Educación Continua en la Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador, la segunda se basó en el muestreo del suelo en el campo para obtener datos de propiedades físicas y químicas, realizado en los cantones El Platanarillo y El Colorado, la tercera etapa fue la generación de mapas de propiedades físicas, químicas, fertilidad del suelo, rendimiento del cultivo de maíz utilizando herramientas de SIG, y recomendaciones técnicas del manejo de la fertilidad de los suelos de acuerdo a los mapas mencionados.

Metodología de campo

Elaboración de Mapa de sitios de muestreo

Para la determinación de los sitios de muestreo en campo se procedió a recopilación de datos existentes: Área de estudio, geología de los suelos, vías de acceso del lugar, Preparación de una cobertura de costos.

Se usó la metodología del LHS, determinando los sitios de muestreo con base a seis variables: Índice de Humedad Topográfica (TWI), Índice de posición topográfica (TPI), Índice de multiresolución de planicie de fondo de valle (MRVBF), pendiente, mapa de geología y Mapa de Costo. Para la georeferenciación de los sitios de muestreo se utilizó equipo de GPS, tomando datos de latitud y longitud.

Cuadro 1. Distancia en metros de múltiplo buffer.

Distancia (m)	10	25	50	75	150	250	500	750	1,000	1,100
---------------	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-------	-------

Mapa de costo

El LHS permitió distribuir las muestras a lo largo del área de estudio, pero en algunos lugares son de imposible o difícil acceso para realizar el muestreo, para esto se realizó un mapa de costo que representa el costo de llegar a los lugares de la zona de estudio tomando en cuenta los atributos del terreno y la cobertura, este mapa de dificultad de muestreo de suelo es creado de acuerdo al mapa de vías y usando el algoritmo de múltiple ring buffer que permite agregar diferentes distancias a partir de un sitio, las cuales se pueden observar en el cuadro 1.

Elaboración de mapa de sitios de muestreo

El mapa de sitios de muestreo se elaboró utilizando la metodología del LHS, en el cual se utilizaron los mapas anteriormente descritos con la extensión TEUI, que consiste en agregar los archivos ráster en la opción de Add Data layer, y una capa de vías de acceso de la zona, luego se definió el número de sitios de muestreo y se guardó en la ubicación de la base de datos.

Toma de muestras

La obtención de las muestras en campo se realizó para estimar el contenido actual de nutrientes del suelo, los sitios de muestreo se ubicaron a una distancia de 15 a 20 m de los linderos (cercos), calles, bordas, quebradas, casas y otras construcciones (Orellana 2005).

De cada sitio de muestreo se tomaron 5 submuestras obtenidas a una profundidad de 30 cm, obteniendo una libra de suelo por submuestra, el muestreo se realizó en forma de cruz partiendo del punto central a una distancia de 5 m, las submuestras se homogenizaron en bolsas plásticas con una pala, obteniendo la muestra compuesta con un palin (2 lb de suelo); a la vez del punto central se tomaron muestras para determinar densidad aparente utilizando el método de los cilindros de un volumen de 98.2 cm³; tomando muestras a los

30 cm de profundidad; posteriormente se colocaron las etiquetas que contiene la información del productor, nombre del productor, localización de la parcela (Georreferenciada) utilizando GPS, fecha, cultivo, entre otros. Las muestras se trasladaron al laboratorio de CENTA para su análisis respectivo

Metodología de laboratorio

Elaboración de mapas de propiedades

Para la elaboración del mapa de propiedades se utilizaron herramientas informáticas como QGIS y los complementos de SAGA y la herramienta especializada en el modelado de suelos conocida como SoLIM (Soil Land Inference Model), para lograr el objetivo se tomaron en cuenta diferentes variables de la topografía local (TPI, TWI, MRVBF, Pendiente).

Elaboración de mapa de clases genéricas

Los atributos de terreno y la geología generados anteriormente son los que mejor representaron los patrones en la topografía local de la zona de estudio, se agruparon por medio del análisis de grupo por cuadrícula, la cual agrupa todas las áreas homogéneas de los mapas de atributo en una misma agrupación, utilizando la sombra como guía visual se determinó que la topografía local se expresa mejor en 6 agrupaciones.

El método Hill-Climbing (Ascenso de colinas), fue el primero utilizado como herramienta para la reconstrucción mediante procesos de optimización, se trata de un algoritmo de descenso. Es decir, que la elección de la dirección de búsqueda se hace de forma exhaustiva y se elige aquella que consigue un mayor descenso, si el nuevo sitio es mejor, se transforma en el sitio actual, si no, otro sitio es seleccionado y evaluado, el método termina cuando no hay mejorías, o cuando se alcanza un número predefinido de interacciones (Hernández, 2013).

Al determinar las 6 agrupaciones se realizó una estadística zonal, determinando los valores de la suma, la desviación estándar, la sumatoria y la diferencia de cada uno de los parámetros seleccionados, estos valores se procesaron en el software SoLIM a través del proceso de inferencia y basados en la lógica difusa, para obtener el mapa de membresía, siendo la base para originar el mapa de clase genérica y los mapas de propiedades físicas y químicas. (Hernández, 2013).

Elaboración de mapas de propiedades químicas y físicas

Al obtener el mapa de clases genéricas y por medio de un archivo con extensión (.lkt) se procedió a agregar por cada elemento químico y físico el valor obtenido por medio del análisis de laboratorio para cada una de las clases resultantes del paso anterior, logrando así elaborar los mapas de propiedades físicas y químicas para la zona de estudio.

Elaboración de mapa de fertilidad

Para la elaboración del mapa de fertilidad del cultivo de maíz, se utilizó la herramienta de QGIS análisis de agrupamiento por cuadrícula, anteriormente descrita, la cual agrupa las características homogéneas de los parámetros analizados, se procesaron las propiedades químicas más importantes en la nutrición del maíz, determinadas con ayuda del conocimiento experto del especialista en fertilidad de suelos, la cuales son: Ca, P, pH, Zn y Mg, juntamente con esta se procesó la geomorfología del suelo, para lograr un mapa de fertilidad con mayor precisión que servirá en la toma de decisiones.

Elaboración de mapa de rendimiento de maíz

El rendimiento a diferencia de otras variables analizadas en el estudio, se conoció de manera puntual para cada uno de los sitios de muestreo, la forma de realizar este proceso fue utilizando datos provenientes del Centro para el Desarrollo Agropecuario y Forestal (CEDAF), del departamento de Morazán, El Salvador, el cual contiene el rendimiento promedio de las parcelas de maíz en kg/ha, los cuales fueron comparados con valores bajo condiciones actuales de fertilidad. De esta forma se estableció un patrón de comportamiento productivo que permitió conocer la certeza del mapa de fertilidad.

Recomendación técnica para el manejo de la fertilidad para el cultivo de maíz

Según IPNI (Institute Plant Nutrition International), (s.f.) La recomendación de fertilización se realizó con base al programa 4R de la nutrición de plantas realizado por IPNI, el cual consiste en el manejo responsable de los nutrientes a través de 4 acciones las cuales son:

Selección de fuente

Dosis adecuada

Momento correcto

Lugar de adecuado

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos muestran que el área de estudio presento variabilidad según las relaciones de suelo-paisaje, esto debido a la calidad de la información seleccionada a partir de los atributos de terreno, generados por medio del modelo de elevación digital con resolución a 10 metros, estos permitieron definir zonas con características diferentes entre sí, ideales para la realización de una investigación de este tipo de carácter descriptivo.

Fase gabinete

Se seleccionaron los atributos del terreno que mejor representaron las características del suelo, los cuales fueron generados a partir del modelo de elevación digital, obteniendo los resultados reflejados en la figura 2.

El tipo de investigación que se desarrolló es fundamental para la selección de los parámetros del suelo que se utilizaron, la calidad y el tipo de información que cada atributo de terreno representa es de importancia para no obtener un resultado erróneo, con la finalidad de conocer cómo se comportan las propiedades químicas en el suelo y la relación que tiene con el rendimiento del cultivo de maíz, se seleccionaron los atributos de terreno siguientes:

Índice de humedad topográfico (TWI)

Índice de Posición Topográfica (TPI)

Índice de multiresolución de Fondo de Valle (MRVBF)

Pendiente

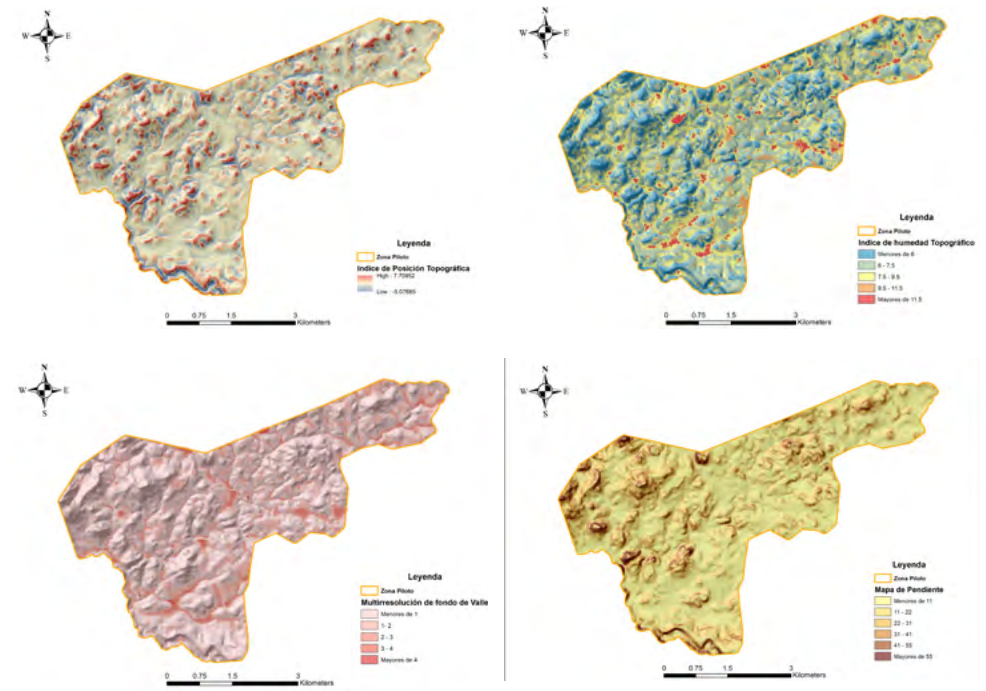


Figura 2. Atributos de terreno para la zona piloto de la investigación

Selección de sitios de muestreo y mapa de clases genéricas

Mediante la metodología del Hipercubo Latino Condicional (LHS) y los resultados obtenidos, se determinaron seis sitios de muestreo para conocer el comportamiento de las propiedades físicas y químicas del suelo, para esto se utilizaron las redes viales de la zona de estudio, con el que se creó un mapa de costo de muestreo (Fig. 3). Cada sitio de muestreo corresponde a una unidad de paisaje diferente una de la otra.

Para la generación del mapa de clases genéricas, se realizó la agrupación de las variables topográficas y del suelo (Geología), obteniendo seis diferentes unidades de suelo-paisaje (Fig. 4) que mejor describen las condiciones del área de estudio, esto se realizó utilizando el criterio del conocimiento experto de los científicos de suelo de la uUniversidad de Purdue.

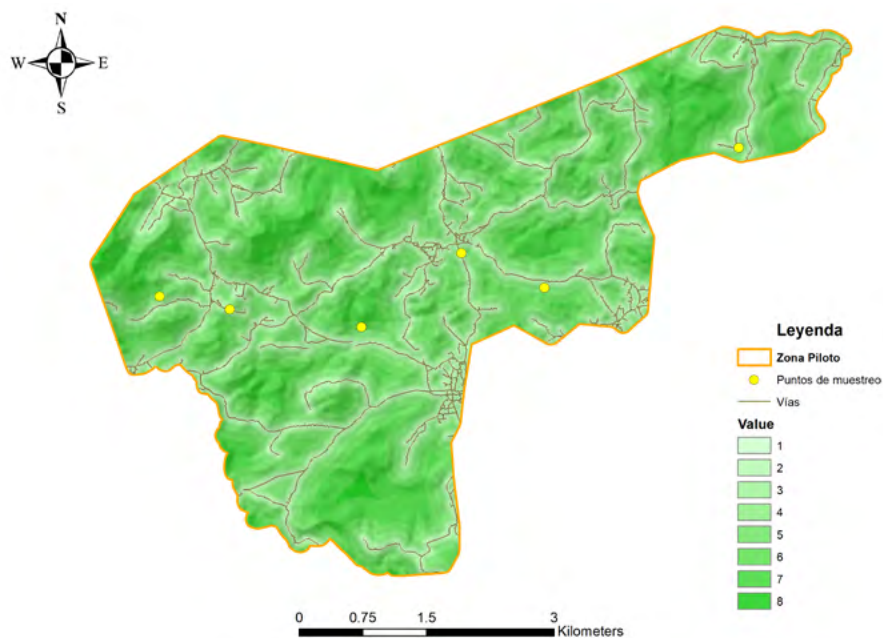


Figura 3. Mapa de sitios de muestreo de suelo

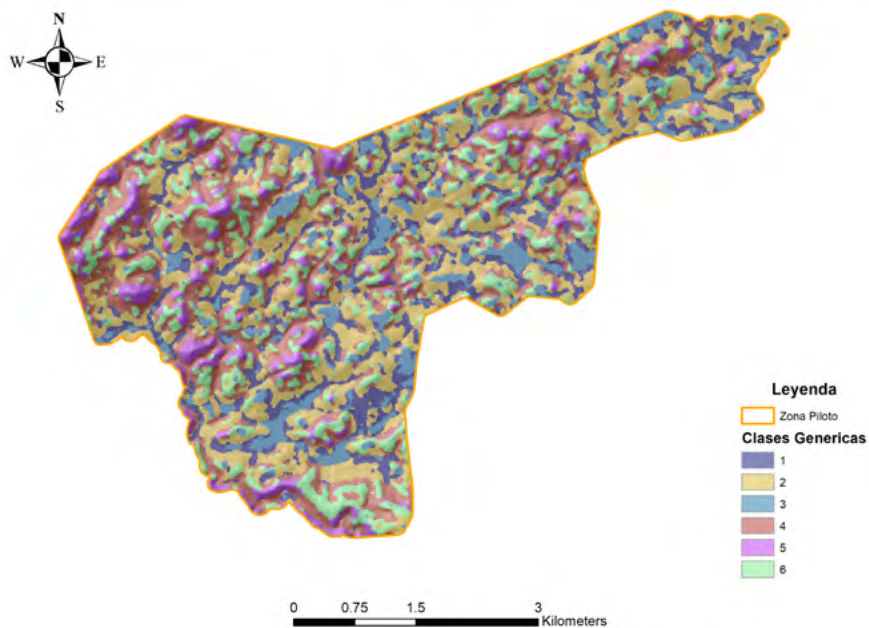


Figura 4. Mapa de Clases Genéricas de la zona de estudio.

Fase de campo

Se tomaron las muestras de suelo, según los sitios que se determinaron por medio de la metodología del LHS, cada sitio de muestreo representa una unidad de paisaje diferente, lo que permitió mejorar el contenido de la investigación.

Fase de laboratorio

Se determinaron los elementos más importantes para el cultivo de maíz expresándose en el cuadro 2.

Cuadro 2. Análisis de suelo de la zona de estudio.

Sitios	Fósforo (mg kg^{-1})		Ca (cmol kg^{-1})		Zn (mg kg^{-1})		Mg (cmol kg^{-1})		pH en agua 1:2,5	
	Valor	Inter.	Valor	Inter.	Valor	Inter.	Valor	Inter.	Valor	Inter.
Sitio 1	5	MB	32.6	A	0.85	B	7.53	A	5.86	MA
Sitio 2	1	MB	30.21	A	0.65	B	7.29	A	5.83	MA
Sitio 3	5	MB	10.71	A	0.63	B	4.14	A	5.7	MA
Sitio 4	10	B	5.57	A	0.39	MB	2.1	A	5.5	FA
Sitio 5	15	A	7.57	A	0.78	B	3.05	A	5.05	FA
Sitio 6	10	B	8.32	A	0.86	B	2.88	A	5	MFA

Rendimiento de maíz

En la figura 5, se observa los rendimientos de maíz por kg/ha de la zona de estudio, los valores mayores se presentan en rangos de 1360-2013 kg/Ha con un área de 14.3 km² representando un 63.0% de la zona, mientras que valores menores de 1360 kg/Ha representan 0.0008 km² que representan el 0.003 % de la zona de estudio.

En la zona de estudio la variedad de maíz que cultivan los productores es el Híbrido H-59, otorgada por el gobierno central por medio de los paquetes agrícolas, dicha variedad de Maíz según el CENTA, s.f, tiene un rendimiento promedio de 6,154.84 – 6,478.78 Kg/Ha (95 – 100 qq/mz) bajo condiciones edafoclimáticas favorables: buena fertilidad, textura franca, suelos bien drenados, profundos y con capacidad de retención de agua.

El rendimiento promedio en la finca de los productores en el área de estudio es de 1,943.43 – 4,664.72 Kg/ Ha (30 a 72 qq/mz) para el año 2015, en donde se produjo la sequía severa afectando el desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz en el departamento de San Miguel, El Salvador Según datos estadísticos reportado por el MAG, (2016).

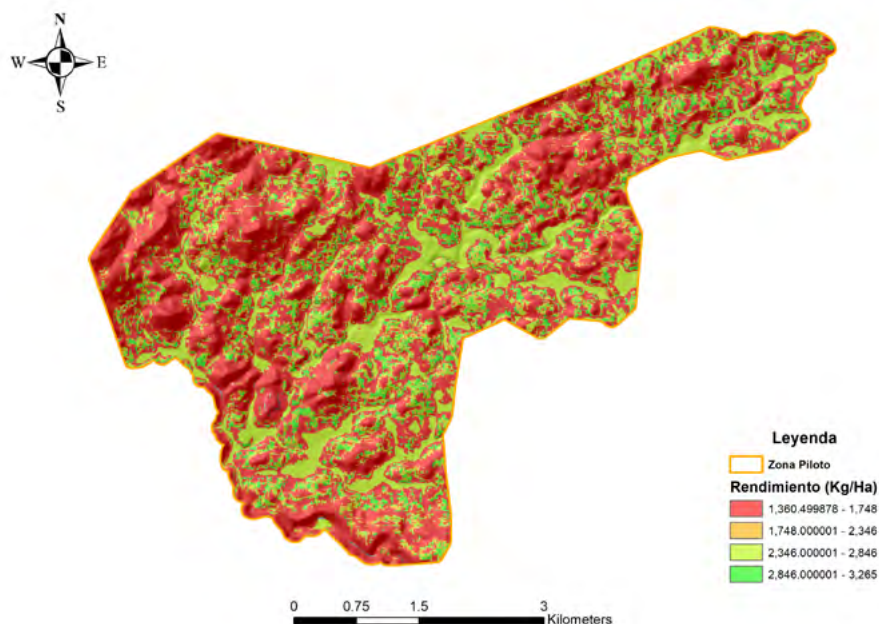


Figura 5. Rendimiento de maíz en los cantones El Platanarillo y El Colorado.

El rendimiento promedio del cultivo de maíz para el año 2015 en el departamento de San Miguel es de 2,591.51 Kg/Ha (40 qq/mz).

Los principales factores asociados con los bajos rendimientos parecen ser las condiciones adversas tales como variaciones en la lluvia, tierra deficiente en nutrimentos, presencia de plagas y enfermedades, y la falta de conocimiento sobre la disponibilidad y el uso de tecnología moderna para reducir el impacto de estas condiciones. Por lo tanto, el pequeño productor de maíz tiende a pensar en el rendimiento como determinado por fuerzas mayores y a buscar el aumento en la producción a través del aumento del área en vez de la producción por unidad de área (CIAT, 1975).

En la investigación realizada por Álvarez y Grigera (2004), determinaron que las variables de mayor impacto sobre el rendimiento del cultivo de maíz son la precipitación seguida por la dosis adecuada de fertilización y el manejo agronómico.

Para el desarrollo de los cultivos no solo importa la fertilidad de los suelos, sino también la humedad presente, la falta de agua es el factor más limitante en la producción de maíz en las zonas tropicales. Cuando hay estrés hídrico o sequía durante las primeras etapas de establecido el cultivo, puede ocasionar

pérdidas de plantas jóvenes, reduciendo la densidad poblacional o estancar su crecimiento (CENTA, s.f).

La falta de humedad en el suelo y las dosis inadecuadas de fertilización se ven reflejado de manera significativa en el rendimiento de maíz, por medio de este estudio se prevé mejorar las condiciones de fertilidad del suelo incorporando un manejo adecuado de los nutrientes requeridos en el suelo, asimismo la adopción de prácticas para el manejo sostenible de los suelos, mejorando de manera significativa el rendimiento del maíz.

Mapa de fertilidad

Según Henríquez *et al.* 2013, el uso del mapa de fertilidad generado a partir de las variables químicas reportadas en el análisis de suelos ha sido catalogado muy útil en el diagnóstico y recomendación de fertilización y aplicaciones de enmiendas en Costa Rica. Ejemplo de ello es lo reportado por Bertsch (2002), quien logró establecer un programa de manejo de la fertilización de acuerdo con las necesidades de cada sitio en fincas sembradas con café y caña de azúcar.

En la figura 6, se observó el grado de fertilidad de los suelos de la zona de estudio para el cultivo de maíz, la zona que posee un área de 8.86 km² son tierras que poseen una alta fertilidad representando un 39.04%, con mayor disponibilidad de los nutrientes importantes para el desarrollo del cultivo de maíz, mientras que las zonas con baja fertilidad poseen un área de 6.77 km² que representa un 29.82% de zona de estudio.

Se determinaron 3 clases de fertilidad, denominada como baja, media y alta fertilidad, con base en las propiedades químicas; fósforo (P), Calcio (Ca), Zinc (Zn), Magnesio (Mg), acidez del suelo (pH), y los atributos de terreno resultantes del modelo de elevación digital.

La fertilidad denominada como alta, son los lugares con pendientes menores en donde se acumula los nutrientes de las zonas alta y medias, por escurrimiento superficial, el pH oscila entre 5.5 a 6, siendo ideal para el aprovechamiento de los nutrientes por parte de las plantas. En los lugares con baja fertilidad tienen pendientes muy pronunciadas, aunque la disponibilidad de macronutrientes sea alta tiene un pH muy fuertemente ácido entre 5.1 a 5.5, imposibilitando la absorción de nutrimentos por parte de las plantas y la disponibilidad de los micronutrientes es muy baja.

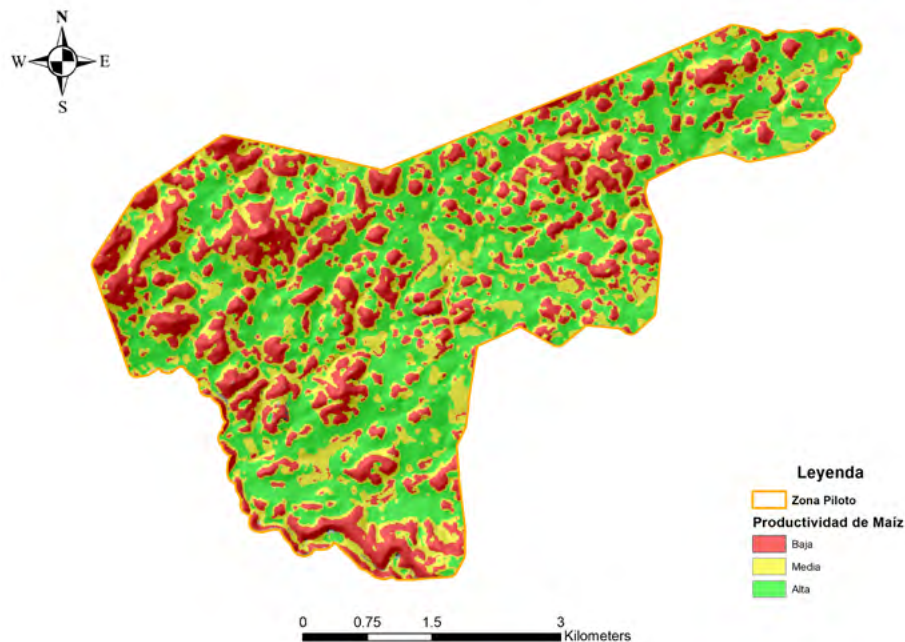


Figura 6. Mapa de fertilidad de los cantones El Platanarillo y El Colorado.

Según Monterrosa, 2016, el mapeo de la fertilidad del suelo es una herramienta de agricultura de precisión que permite comprender el comportamiento de las condiciones del suelo, sean estas químicas, físicas, biológicas o sintética, sirviendo como herramienta para diagnosticar la fertilidad y servir como guía en la implementación de recomendaciones de manejo y fertilización.

Al sobreponer el mapa de rendimiento de maíz sobre el de fertilidad de suelos, se determinó que los rendimientos mayores coinciden con una alta fertilidad y los rendimientos menores con una fertilidad baja, mediante el análisis visual que se realiza y aplicando el conocimiento experto, se puede recomendar un plan de manejo de fertilización adecuado según sea el caso de cada finca del productor.

Recomendaciones de manejo de fertilidad

Con base a los resultados de análisis de suelo y el requerimiento de la variedad de maíz H- 59 (Cuadro 3), se realizaron los siguientes cálculos para determinar las recomendaciones técnicas para el manejo de fertilización para cada finca (Cuadro 4).

Cuadro 3. Requerimiento de la variedad de maíz H-59.

Elemento	N	P	K
Kg/Ha	113	52	113

Cuadro 4. Recomendaciones de manejo de fertilidad.

Plan de Fertilización						
Productor	D	Primera	Días	Segunda	Días	Encalado
Sitio 1	S	213 Kg/ha 18-46-0/Ha+ 12 Kilogramo de sulfato de Cobre (CuSO4.5H2O) /Ha + 100 kg/ha de sulfato de Hierro (FeSO4.7H2O) /Ha + 32 kg/ha de sulfato de zinc (ZnSO4.7H2O)	30 D/S	162 kg/ha de Urea	----	7 qq de CaMg (CO ₃) ₂ /mz
Sitio 2	S	263 kg/ha de 18-46-0+ 224 Kg/ha de fertilizante granulado 0-0-6 + 63 kg/ha de sulfato de Hierro (FeSO4.7H2O)+ 34 Kg/ha de sulfato de zinc (ZnSO4.7H2O)	30 D/S	143 kg/ha De Urea + 223 kg/ha de 0-0-60	----	7 qq de CaMg (CO ₃) ₂ /mz
Sitio 3	S	213 Kg/ha 18-46-0/Mz + 58 kg/ha de sulfato de Hierro (FeSO4.7H2O) + 17 kg/ha de sulfato de zinc (ZnSO4.7H2O)	30 D/S	162 kg/ha de Urea	----	8 qq de CaMg (CO ₃) ₂ /mz
Sitio 4	S	150 Kg/ha de 18-46-0 + 13 kg/ha de sulfato de Cobre (CuSO4.5H2O)+ 108 kg/ha de sulfato de Hierro (FeSO4.7H2O) + 36 kg/ha de sulfato de zinc (ZnSO4.7H2O)	30 D/S	187 kg/ha de Urea	-----	11 qq de CaMg (CO ₃) ₂ /mz
Sitio 5	S	137 Kg/ha de 18-46-0 + 96 Kg/ha 0-0-60 + 13 Kg/ha de sulfato de cobre (CuSO4.5H2O) + 33 kg/ha de sulfato de zinc (ZnSO4.7H2O) /Ha	30 D/S	192 kg/ha de Urea + 96 kg/ha de 0-0-	Un mes antes de fertilizar	16 qq de CaMg (CO ₃) ₂ /mz
Sitio 6	S	150 Kg/ha de 18-46-0/Ha + 11 Kg/ha de sulfato De Cobre (CuSO4.5H2O) + 32 kg/ha (ZnSO4.7H2O) /Ha	30 D/S	187 kg/ha de Urea	Un mes antes de fertilizar	15 qq de CaMg (CO ₃) ₂ /mz

Conclusiones

Los productores de granos básicos en El Platanarillo y El Colorado según los análisis de suelo mostraron baja fertilidad natural en las partes altas presentando deficiencias en fósforo, zinc, cobre y Hierro, además en las partes bajas presentaron una mejor fertilidad, esto debido a los efectos de la topografía y desarrollo del suelo (suelos jóvenes), poca lluvia y el material parental el cual es pobre en minerales y eso se refleja en los rendimientos del maíz.

Es necesario aplicar otra técnica de manejo de la fertilidad del suelo cuando el sistema de tenencia de tierra sea arrendamiento con el objetivo de evitar el incremento de los gastos. Una de estas técnicas podría ser la aplicación de foliares cuando la presencia de micronutrientes sea baja, manejo de cobertura del suelo para preservar humedad y obras de conservación para evitar pérdida de suelo y pérdidas de nutrientes por erosión.

La cartografía base permitió describir las condiciones de la zona de estudio en las que en las partes altas existe un 45% de pendiente, una menor acumulación de humedad debido a que eran zonas de valle o cerro lo que permite el lavado de nutrientes; en las partes bajas se encontraban pendientes menores al 15% además de zonas de mayor acumulación de humedad debido a que son zonas planas que se encuentran en los fondos de valle por lo que se tenía una mejor fertilidad y por eso se presentaban mejores rendimientos para los productores.

Con base al mapa de rendimiento generado por la investigación se realizó la validación del mapa de fertilidad, como un resultado viable de la interacción entre los procesos físico- químicos en el suelo, el cual permitió diferenciar las zonas de mayor fertilidad que corresponde a un 39.04% y las zonas de menor fertilidad en un 29.82%, del área total de los cantones El Platanarillo y El Colorado, municipio de Comacarán, San Miguel

Recomendaciones

Implementar medidas alternativas a las tradicionales para lograr mejores rendimientos del cultivo de maíz, como la utilización de rastrojos para el aporte de nutrientes al suelo, abonos foliares, obras de conservación y aplicación de fertilizantes con base al análisis de suelo.

Implementar herramientas tradicionales que ayuden a mejorar las técnicas de conservación de suelos, como por ejemplo los mapas de propiedades de suelo, metodologías para la determinación de sitios de muestreo en campo.

Implementar programas de capacitación para la adopción de nuevas metodologías por parte de los productores sobre el manejo de la fertilidad de los suelos mediante herramientas innovadoras.

Implementar el uso de mapas digitales de suelos para el desarrollo de recomendaciones del uso del suelo y manejo de la fertilidad en la zona de estudio, además es necesario que este tipo de estudios se extiendan a zonas donde se presentan condiciones similares.

Bibliografía

- Álvarez, R; Grigera, S. 2004. Factores de Fertilidad y Manejo Determinantes de los Rendimientos de Trigo y Maíz en la Pampa Ondulada. Universidad de Buenos Aires, AR. p 5.
- Andrades R; Martínez A. 2010. Manejo de la Fertilidad de los suelos. Colombia. CL. 3 p.
- Bertsch, F. 2002. La fertilidad de los suelos y su manejo: Asociación Costarricense de la Ciencia del suelo. San José, CR. p. 43- 58
- CENTA (Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal, SV). s.f. Guía técnica: el cultivo de Maíz. San Salvador, El Salvador, SV. 15 p.
- CIAT (Centro Interamericano de Administraciones Tributarias). 1975. Descripción de factores asociados con bajos rendimientos de maíz en finca pequeñas de tres departamentos de Colombia. Cali. CO. p 4
- Henríquez, C; Méndez J, C; Masis, R. 2013. Interpolación de variables de fertilidad de suelo mediante el análisis kriging y su validación. San José, CR. p 8
- Hernández, D. 2013. Desarrollo, implementación y prueba de un algoritmo de reconstrucción de objetos a partir de una representación axonometría, utilizando técnicas de optimización. Universidad Politécnica de Valencia. ES. 37 p
- IPNI (International Plant Nutrition Institute), sf. Micronutrientes de los suelos agrícolas. Estados Unidos de America, USA p. 24-36.
- MAG (Ministerios de Agricultura y Ganadería, SV). 2016. Informe anual sobre costos de producción de cultivos agrícolas 2015. San Salvador, SV. 5 p.

- MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2015. Boletín Climatológico Mensual Anual 2015. 16 p.
- MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2016. Cuatro años continuos de sequía en El Salvador: 2012 -2015. Santa Tecla, SV, p 10.
- Monterrosa, R. 2016. Plan de manejo de precisión PMP. Quito. ECU. p 6.
- Orellana J, A. 2005. Muestreo y análisis de suelo: Boletín Técnico17 (en línea). San Andrés, SV. consultado 15 mar. 2016. Disponible en http://www.centa.gob.sv/uploads/documentos/Suelos_Boletin.pdf
- PRISMA (Programa Salvadoreño de Investigación sobre Desarrollo y Medio Ambiente). 2015. Mapeo digital de suelos. Mancomunidad La Montañona. El Salvador. SV. 4 p.
- Rosas, V. C; Arribillaga, D. G. sf. Potencial productivo en base a la profundidad de los suelos del Valle de Chile Chico. CH. 2 p.