

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ambiente y Desarrollo
Ingeniería en Ambiente y Desarrollo



Proyecto Especial de Graduación

**Estudio de la variabilidad temporal y espacial del fósforo total y
pH bajo diferentes rotaciones de cultivos y fertilización en los suelos
de las Parcelas Morrow, Illinois, Estados Unidos**

Estudiante

Cindy Lisbeth Guardado Moncada

Asesores

Jose Fernando Tercero, M.Sc.

Andrew Margenot, Ph.D.

Ricardo Peña Venegas, Ph.D.

Honduras, octubre 2022

Autoridades

TANYA MÜLLER GARCÍA

Rectora

ANA MARGARITA MAIER

Vicepresidenta y Decana Académica

ERIKA TENORIO MONCADA

Directora Departamento Ambiente y Desarrollo

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Contenido

Índice de Cuadros.....	5
Índice de Figuras	6
Índice de Anexos.....	7
Resumen	8
Abstract.....	9
Introducción.....	10
Materiales y Métodos.....	16
Ubicación del Estudio.....	16
Diseño del Estudio	17
Toma de Muestras	18
Conservación de Muestras.....	18
Análisis de Laboratorio	19
Toma de pH.....	19
Toma de Fósforo Total.....	19
Variabilidad Espacial	20
Semivariograma	20
Dependencia Espacial	22
“Kriging” Ordinario.....	22
Resultados y Discusión.....	25
Comportamiento del Fósforo Total Sobre el Tiempo	25

	4
Relación del pH Sobre el Fósforo Total.....	33
Variabilidad Espacial	36
Semi-variogramas	38
“Kriging” Ordinario.....	39
Predicción de la Distribución Espacial.....	39
Conclusiones	43
Recomendaciones.....	44
Referencias.....	45
Anexos.....	51

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Concentraciones del fósforo total presente en los suelos de las subparcelas NA y NB de las Parcelas Morrow, desde 1904 hasta el 2021.....	26
Cuadro 2. Concentraciones del fósforo total presente en los suelos de las subparcelas SA y SB de las Parcelas Morrow, desde 1904 hasta el 2021.....	29
Cuadro 3. Media y Desviación Estándar del pH y Fósforo Total para nueve tratamientos de las Parcelas Morrow, entre 0 – 15 cm de profundidad, para el año 2021.	34
Cuadro 4. Estadística descriptiva del pH y fósforo total de las subparcelas NA, SA y SD de Parcelas Morrow.	37
Cuadro 5. Modelo de los semivariogramas para el pH y fósforo total	38

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa satelital de las Parcelas Morrow ubicadas en el campus Urbana – Champaign de la Universidad de Illinois.....	16
Figura 2. Distribución de los sistemas de fertilización y rotación de cultivos en las Parcelas Morrow	17
Figura 3. Concentraciones del fósforo total presente en los primeros 17 cm de profundidad del suelo de las Parcelas Morrow, desde 1904 hasta el año 2021, bajo cinco sistemas de rotación (CC-CSb-COt-COtH-CSbH) y cuatro sistemas de fertilización (MLP – LNPK – NF – LhiLNPK).	27
Figura 4. Concentraciones del fósforo total presente entre los 18 – 30 cm de profundidad del suelo de las Parcelas Morrow, desde 1904 hasta el año 2021, bajo cinco sistemas de rotación (CC-CSb-COt-COtH-CSbH) y cuatro sistemas de fertilización (MLP – LNPK – NF – LhiLNPK).	28
Figura 5. Media de la concentración de fósforo total para cada profundidad.....	31
Figura 6. Semivariogramas de los parámetros de pH y P para los suelos de las Parcelas Morrow a una profundidad de 15 cm.....	39
Figura 7. Validación cruzada de los parámetros de pH y P para los suelos de las Parcelas Morrow a una profundidad de 15 cm.....	40
Figura 8. Mapas de predicción y desviación para el pH y fósforo total presente en los primeros 15 cm de profundidad del suelo de las parcelas Morrow.	41

Índice de Anexos

Anexo A. Resumen de los principales cambios realizados en las Parcelas Morrow desde 1876 hasta 2009	51
Anexo B. Regresión múltiple y Correlación de Spearman	52
Anexo C. Parcelas Morrow.....	53
Anexo D. Toma de muestra con uso de barreno	54
Anexo E. Toma del Fósforo Total	55
Anexo F. Toma de pH	57

Resumen

Las Parcelas Morrow son un experimento a largo plazo establecido en 1876 (actualmente con 146 años), que facilita comprender los efectos a largo plazo de las prácticas agrícolas. Actualmente existe un registro limitado sobre el P en el suelo de las Parcelas Morrow. Por ello en esta investigación se realizó un análisis temporal en las concentraciones del P en 12 parcelas, donde se establecieron un total de 16 tratamientos desde 1904 hasta el 2021, a dos profundidades: entre 0 – 17 cm y 18 – 34 cm. Además, se determinó la relación y comportamiento espacial del pH y el P frente a nueve tratamientos a una profundidad entre los 0 - 15 cm. Se determinó que las concentraciones del P se ven afectadas principalmente por la aplicación de fertilizante y la profundidad del suelo. La rotación de cultivos presenta un efecto corto sobre el contenido del P en el suelo y el tiempo demostró ser un indicativo en la velocidad de agotamiento del P para suelos no fertilizados. El P presentó una correlación positiva baja con el pH del suelo ($r: 0.23, P < 0.001$), donde un pH ligeramente ácido favorece las concentraciones del P. Por otro lado, las rotaciones con alta frecuencia de maíz demostraron favorecer la acidificación de los suelos, afectando negativamente las concentraciones de P. Con el uso de los semivariogramas y el “Kriging” ordinario se determinó una alta dependencia espacial a distancias menores a los 34 m con una variabilidad alta, este efecto es causado por la diversidad de prácticas agrícolas establecidas en el área.

Palabras clave: Dependencia espacial, estiércol, “Kriging” ordinario, semivariogramas, variabilidad espacial.

Abstract

The Morrow Plots are a long-term experiment established in 1876 (currently in year 146), that facilitates the understanding of phosphorus (P) behavior under different scenarios at small-scale. In this research, a temporal analysis of P concentration was carried out in 12 plots, where a total of 16 treatments were established from 1904 to 2021, and at two depths: between 0 - 17 cm and 18 - 34 cm, in the Morrow Plots soil. In addition, the relationship and spatial behavior of pH and P was determined for nine treatments at a depth between 0 - 15 cm. It was determined that P concentrations are mainly affected by fertilizer application and soil depth. Crop rotation shows a little effect on soil P content and time was taken as an indicative of P depletion for unfertilized soils. P presented low positive correlation with soil pH ($r: 0.23, P < 0.0001$), where soils with slightly acidic pH improved P concentrations. On the other hand, the crop rotations with high maize frequency proves to be favorable soil acidification, negatively affecting P content. With the use of semivariograms and ordinary Kriging, a high spatial dependence was determined at distances less than 34 m with a high variability, this effect is caused by the diversity of agricultural practices established in the area.

Keywords: Manure, Kriging Ordinary, semivariograms, spatial dependence, spatial variability.

Introducción

Los experimentos a largo plazo (LTEs por sus siglas en inglés) tienen como objetivo principal cuantificar los efectos de la producción agrícola sobre el rendimiento del cultivo. Los estudios generalmente de más de 50 años, sin embargo, no existe una cantidad de años exacta que determine un experimento como LTE. Los LTEs cuentan con un conjunto de datos que ayudan a entender el comportamiento tanto espacial como temporal de procesos biológicos, químicos y físicos que ocurren dentro de un sistema de producción de cultivos. Se pueden estudiar los microorganismos, las enzimas, hongos y patógenos presentes en los suelos archivados. También, ayudan a entender los procesos biogeoquímicos y cómo estos se ven afectados por la producción agrícola (Nafziger y Dunker, 2011; Rasmussen et al., 1998).

Uno de los principales factores que influye en la productividad agrícola es el pH del suelo, debido a que es un parámetro que está fuertemente involucrado en reacciones y procesos químicos del suelo. El pH afecta directamente la solubilidad de los nutrientes, alterando la movilidad y disponibilidad de los mismos (Penn y Camberato, 2019). Los LTE's son una fuente de información sobre el funcionamiento del pH en el suelo y los principales factores que le afectan, siendo estos: las prácticas de fertilización, la rotación de cultivos y el control de residuos orgánicos (Clark et al., 1998; Rivera et al., 2018).

El uso de fertilizantes es uno de los factores esenciales para mantener la producción agrícola (Haynes y Naidu, 1998). El establecimiento de un programa de fertilización ayuda a mantener los nutrientes del suelo en equilibrio. Los fertilizantes reponen los nutrientes absorbidos por los cultivos y aumentan la disponibilidad de estos en el suelo, ayudando a suplir la demanda nutritiva de los cultivos (Marina Ilusca, 2010). El fósforo (P) es un macronutriente involucrado en el crecimiento de los cultivos y es esencial para procesos bioquímicos que afectan específicamente la energía y regulación de crecimiento (Marina Ilusca, 2010). Las mayores concentraciones de P se encuentran en las partes más jóvenes de la planta, por lo cual su deficiencia se ve comúnmente reflejado en las hojas

más longevas. Cuando la planta madura, el P se mueve hacia la semilla y/o a la fruta. La deficiencia de este nutriente causa efectos en la calidad de la semilla, bajando la viabilidad y el porcentaje de germinación, además, causa raquitismo y retraso en la maduración (Marina Illusca, 2010; Prince, 2006; Thompson, 1982).

Mayormente, el P se encuentra en el suelo como ortofosfatos con la forma iónica PO_4^{3-} . La predominancia depende del pH, por lo que, en suelos ácidos con pH entre 4 a 6, el ortofosfato monovalente (H_2PO_4) predomina, mientras que, en suelos con $\text{pH} > 7$ el fosfato de hidrógeno (HPO_4^{2-}) es predominante (Holtan et al., 1990; Thompson, 1982). El P es el nutriente con menor disponibilidad y movilidad en el suelo, siendo su disponibilidad altamente dependiente del pH. El P tiene la tendencia de formar pares de iones con calcio (Ca) y magnesio (Mg) a pH entre 7 (neutral) y 8.5 (moderadamente alcalino), afectando su disponibilidad (Hinsinger, 2001; Lindsay, 1979; Ruiz L., 1992). Por otro lado, en suelos entre ligeramente y fuertemente ácidos el P crea pares de iones de aluminio (Al), mientras que en suelos mayores a 5.5 (extremadamente ácido) forma pares de iones de hierro (Fe), ambos inmovilizando el P (Penn y Camberato, 2019). Convirtiéndose en un factor limitante para el crecimiento de las plantas (Batjes, 1997). Además, del pH, la temperatura del suelo, la baja humedad, suelos tubosos o húmicos afectan la disponibilidad del P debido al bajo contenido de este nutriente, así como su baja solubilidad (Fernández, 2007).

En Estados Unidos, el maíz y la soja representan el 49% de la producción de granos, convirtiéndolos en los principales cultivos (Strom et al., 2020). Entre el 83 y 94% de la producción de cultivos en Estados Unidos tienen establecido un sistema de rotación. La rotación de cultivos se convirtió en la práctica con mejor aceptación, principalmente la rotación de dos años de maíz-soja (Wallander, 2020). Con la rotación maíz-soja se ha demostrado que se obtiene un incremento en la producción, entre 5 y 20% durante un periodo de dos años (Bullock, 1992).

La rotación de cultivos ha mostrado una larga lista de beneficios a largo plazo, mejorando la humedad del suelo, la disponibilidad de nutrientes y la estructura del suelo, entre otros aspectos

(Crookston et al., 1991; Karlen et al., 2006). Además, ayuda al control de plagas, malezas y a la reducción de fitotoxinas por residuos vegetales (Ballesta, 2007). También, puede afectar la dinámica del carbono (C) en el suelo y la de nutrientes asociados como el nitrógeno (N), el potasio (K) y el P (Campbell, 1978). Los beneficios de un sistema de rotación dependen de los cultivos establecidos, por ejemplo, la rotación leguminosa-cereal que ayuda al mejoramiento de la estructura del suelo, aumentando la aireación, nitrificación y drenaje. Por otro lado, en una rotación de leguminosa – hortaliza se ha reportado un enriquecimiento en N y materia orgánica (MO) (Ballesta, 2007). El uso de leguminosas como cultivo rotativo ayuda a aumentar la MO del suelo mediante la agregación de abono verde proveniente de la descomposición de los residuos y a través de las actividades de las raíces vivas (Latif et al., 1992). También, el establecimiento de cultivos secuenciales ayuda al aprovechamiento de la alelopatía positiva y los efectos antagonistas en la protección fitosanitaria (Ballesta, 2007).

La variabilidad espacial del suelo se presenta en diferentes escalas, suelos considerados homogéneos pueden presentar una variabilidad alta en las propiedades biogeoquímicas (Jaramillo et al., 2008). Para predecir la variabilidad espacial de los suelos se creó la geoestadística, ciencia aplicada que estudia las variables distribuidas espacialmente, partiendo de una muestra representativa (Obando et al., 2006). Durante décadas se han desarrollado técnicas para predecir la variabilidad espacial, como el “Kriging” Ordinario, la ponderación inversa a la distancia y la red artificial (Guan et al., 2017). Estudiar la variabilidad espacial permite analizar y predecir fenómenos en espacio y tiempo, como la ley de los metales, densidad de los suelos, concentraciones de contaminantes, propiedades químicas del suelo y otras (Díaz, 2002). Asimismo, el estudio de la variabilidad espacial es de utilidad para la creación de sistemas de muestreo y al mejoramiento de la agricultura de precisión (Lopez et al., 1994).

La aplicación de la geoestadística facilita el estudio de la variabilidad espacial del P, variabilidad que puede ser influenciada por factores intrínsecos (topografía, material parental, pH y otras) y extrínsecos (fertilización, labranza y otros) del suelo (Daniels et al., 2001). El suelo posee una

mayor variabilidad espacial en plantaciones agrícolas que en condiciones naturales (Jaramillo, 2012). El uso histórico del suelo ejerce un fuerte efecto sobre la variabilidad del P. Por ejemplo, el tipo y la forma de aplicación del riego y del fertilizante generan diferentes efectos sobre la variabilidad de los nutrientes (Cambardella et al., 1994; Jaramillo, 2012). Entender la variabilidad espacial del P es esencial para un buen manejo del nutriente (García et al., 2020).

Las Parcelas Morrow son un LTE creado en 1876 que se ha convertido en el segundo experimento más antiguo del mundo con 146 años cumplidos en el 2022. Tiene como objetivo principal el estudio de la sostenibilidad y productividad en plantaciones agrícolas, siendo el maíz, el grano principal de estudio. Las Parcelas Morrow cuentan con la rotación de cultivos y el uso de fertilizantes orgánicos e inorgánicos como factores principales que afectan la producción. El experimento se estableció originalmente en 5 ha divididas en 10 parcelas con un total de tres rotaciones, descritas así: maíz – maíz (*Zea mays L.*), maíz – avena (*Avena Sativa*) y maíz – avena – heno incluyendo trébol dulce y rojo (*Melilotus alba* y *Trifolium pratense*). Además, se establecieron tres sistemas de fertilización, NF (No Fertilizado), NPKS (Nitrógeno, Fósforo, Potasio y Sulfuro de Amonio) y estiércol (Aref y Wander, 1997). Con el paso del tiempo, las Parcelas Morrow sufrieron una serie de cambios en tamaño del área de estudio y tratamientos aplicados, resumidos en el Anexo A. Las Parcelas Morrow han sido una fuente de información principal para el entendimiento de los factores que afectan la buena productividad y sostenibilidad de una plantación agrícola (Aref y Wander, 1997).

Junto a las Parcelas Morrow la agricultura en general sufre grandes cambios; por ejemplo, el establecimiento de granjas especializadas con una expansión del 67%, causando un aumento en la producción y economía. Además, se comienza a emplear el uso de tractores reemplazando a los animales, el uso de pesticidas y fertilizantes. La aceptación de la tecnología mantuvo un rendimiento del 1.9% anuales entre 1948 a 1999 (Dimitri et al., 2005).

Durante casi un siglo y medio las Parcelas Morrow han sido una fuente de información esencial para entender el comportamiento de los nutrientes, especialmente el N y C, dentro de las prácticas de rotación y fertilización que poseen. Durante 145 años, las prácticas empleadas en las parcelas han afectado el comportamiento químico y espacial del P y el pH del suelo. Sin embargo, no existe un registro actual que muestre los cambios que ha sufrido el P a través del tiempo, y cómo la variabilidad espacial de este y del pH se ve afectada por las diferentes prácticas agrícolas que se han empleado en las Parcelas Morrow.

El P en el 2014 fue declarado recurso limitado por la Comisión Europea, convirtiéndose en un problema para la producción agrícola y la seguridad alimentaria (George et al., 2016). Donde los pequeños agricultores son los más afectados debido a la falta de infraestructura de fertilización, provocando pérdidas económicas por el mal aprovechamiento del P acumulado en el suelo. Además, tienen limitaciones financieras, causadas por el difícil acceso a los fertilizantes fosforados y difícil transporte a zonas rurales (Balemi y Negisho, 2012). También, con el mal uso del nutriente, aumenta el riesgo de eutrofización por lixiviación de P o por pérdida de este en las aguas de escorrentía (George et al., 2016). El entender el P como nutriente limitado frente a diferentes prácticas agrícolas es esencial para el mantenimiento de una producción sostenible y sustentable para disminuir riesgos económicos y ambientales.

El estudio del P en las Parcelas Morrow ayuda a proyectar el manejo en diferentes escenarios a pequeña escala. Por este motivo, el propósito de este estudio fue identificar el comportamiento del P frente a diferentes rotaciones de cultivos y sistemas de fertilización. Para ello, se desarrolló una línea de tiempo desde 1904 hasta el año 2021, junto a un estudio de variabilidad espacial del pH y P para el año 145 de las Parcelas Morrow. Los objetivos del presente estudio fueron:

Identificar los cambios en el fósforo total a dos diferentes profundidades estableciendo una línea de tiempo desde 1904 hasta el 2021.

Identificar los efectos que la rotación de cultivos y la fertilización ejercen sobre el comportamiento del fósforo total y el pH.

Determinar la relación que posee el pH sobre las concentraciones del fósforo total.

Determinar la variabilidad y la interrelación del fósforo total y el pH para el año 145 del experimento.

Materiales y Métodos

Ubicación del Estudio

El estudio se realizó en la Universidad de Illinois Urbana – Champaign (UIUC), Estados Unidos; las prácticas agrícolas establecidas por la universidad, se realizaron en las Parcelas Morrow (40°06'15" N, 88°13'34" W) (Nafziger y Dunker, 2011). Estas se encuentran ilustradas en la Figura 1. El sitio de estudio se ubica en una zona templada, a una elevación de 233 msnm, con temperaturas entre – 7 y 29 °C anuales, con una humedad relativa alta entre 62 y 70% y una precipitación anual aproximada a 1,070 mm.

Figura 1

Mapa satelital de las Parcelas Morrow ubicadas en el campus Urbana – Champaign de la Universidad de Illinois

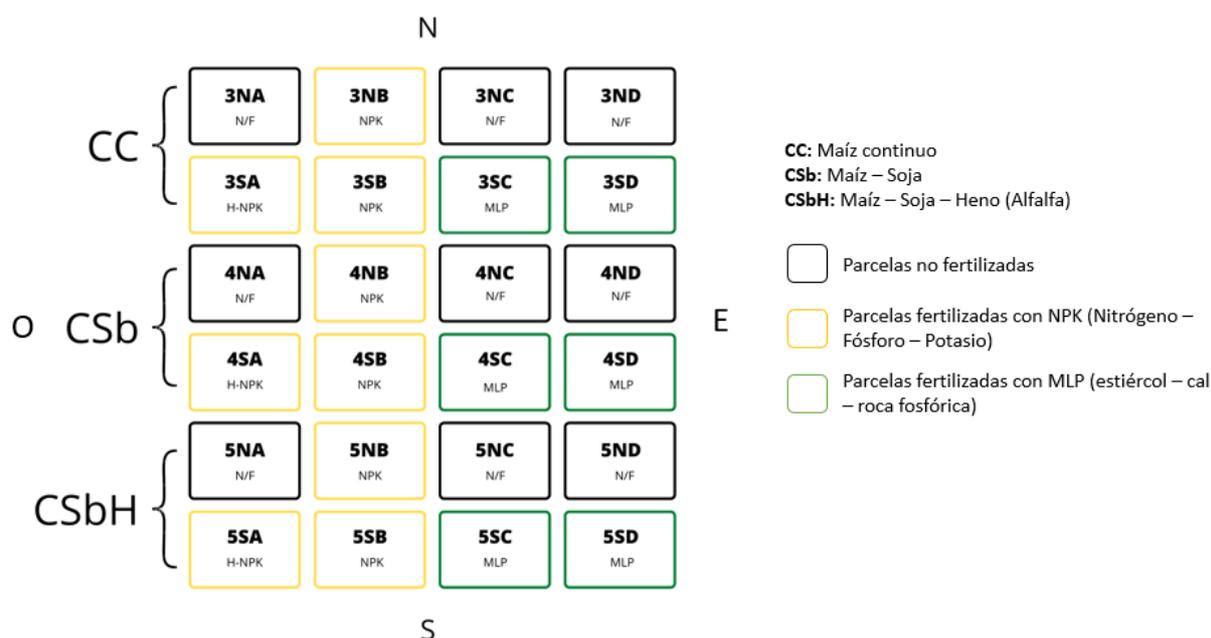


Diseño del Estudio

El experimento está establecido en un área de 0.32 ha (40 × 72 m) con un diseño factorial de parcelas divididas. El experimento está conformado por las parcelas 3, 4 y 5, cada una con un sistema de rotación única (maíz continuo [CC], maíz – soja [*Glycine max*] [CSb] y maíz – soja – alfalfa [*Medicago sativa*] [CSbH] respectivamente). Cada una de las parcelas están subdivididas en ocho subparcelas en norte (N), sur (S), este (E) y oeste (O); sin embargo, las parcelas O se subdividieron en A y B y las parcelas E en C y D (Figura 2), obteniendo un total de 24 subparcelas de 10 × 12 m (0.12 ha) con distintos sistemas de rotación y fertilización (Nafziger y Dunker, 2011).

Figura 2

Distribución de los sistemas de fertilización y rotación de cultivos en las Parcelas Morrow



Según la clasificación de suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés), las Parcelas Morrow presentan suelos pertenecientes al orden taxonómico de los molisoles, clase “Aquic Argiudolls”, fino, esméticos, méxicos, de serie Flanagan. Suelos profundos con un drenaje natural pobre de textura franco limoso, drenados mediante baldosas subterráneas desde 1904, con una pendiente ≤ 7% (Nafziger y Dunker, 2011). Presentan un color pardo oscuro hasta los 38 cm de profundidad y un pardo oscuro grisáceo a profundidades > 38 cm.

Suelos desarrollados bajo pastizales sobre un terreno glaciar calcáreo con un epipedón mólico de 25 a 50 cm, con pH ligeramente ácidos y con una estructura granular media (Aref y Wander, 1997; National Cooperative Soil Survey U.S.A, 2015).

Toma de Muestras

Debido a inexistencia de muestras entre los años de 1876 (año de fundación) y 1903 (Aref y Wander, 1997); el estudio se realizó desde 1904 (año de las primeras tomas de muestra de suelo de la Parcelas Morrow) hasta el año 2021. Para la creación de la línea de tiempo se escogieron las subparcelas NA, SA, NB y SB, donde las NA son las subparcelas que no reciben un tratamiento de fertilización. La aplicación de LNPK (cal + nitrógeno + fósforo + potasio) se realiza en tres subparcelas, SA (LhiNPK [rico en N] desde 1967), NB (desde 1955, no tratada); SB (desde 1955, tratada con MLP [estiércol + cal + roca fosfórica]) (Nafziger y Dunker, 2011). Por otra parte, se seleccionaron las parcelas NA, SA y SD para conocer mejor el efecto del uso de fertilizantes vs. la rotación de cultivos y la variabilidad espacial. Las parcelas SD son fertilizadas con MLP como el fertilizante orgánico (Nafziger y Dunker, 2011).

Para la toma de muestras del año 2021 se realizó un muestreo aleatorio simple, para ello, primero se hizo una cuadrícula de 1 × 1.5 m en cada una de las subparcelas seleccionadas. Seguidamente, con el uso de un barreno se recolectaron dos submuestras de suelo en diferentes puntos a una profundidad de 0 – 15 cm, para después crear una muestra compuesta por cuadrante. De esta manera, se obtuvieron 30 muestras por subparcela; un total de 270 muestras para analizar. Posteriormente, las muestras de suelo fueron secadas al aire libre durante 5 a 7 días. Al tener el suelo seco, se procedió a homogenizar y se tamizaron a < 2 mm.

Conservación de Muestras

Las muestras de suelo seco y molido, recolectadas desde 1904 hasta el 2020, fueron conservadas en frascos herméticos de vidrio. Por otro lado, las muestras recolectadas en el 2021,

después de ser tamizadas, se conservaron en bolsas herméticas de plástico. Todas las muestras fueron conservadas a una temperatura de 25 °C.

Análisis de Laboratorio

Toma de pH

Para la toma de pH, primero se debe de crear una solución 1:1 proporciones de suelo/agua. Por lo que, se pesó 4 g de suelo en un tubo de ensayo de 15 mL y, con ayuda de una pipeta, se le agregaron 4 mL de Nanopure (Ω); ya lista la mezcla se procedió a agitar por 15 min. Mientras las muestras se homogenizaban, el potenciómetro se calibró con el uso de soluciones amortiguadoras, siguiendo el orden 7 – 4 – 10. Al calibrar, se obtuvo un estándar de referencia del 97% como mínimo de confianza. Cuando el porcentaje de confianza es menor $\leq 96\%$, las soluciones amortiguadoras se cambian y se vuelve a realizar la calibración. Al pasar los 15 min, las muestras se dejaron en reposo por aproximadamente 2 min y se procedió a la toma del pH.

Toma de Fósforo Total

El fósforo total se obtuvo mediante el método de fusión; para ello, 0.25 g de suelo previamente molidos, fueron encapsulados en 0.40 g de metaborato de litio en crisoles de carbono. Seguidamente, las muestras fueron colocadas en un horno mufla a 1,000 °C por 30 min, formando una perla. Las perlas se disolvieron en 45 mL de solvente al 1.6% de ácido clorhídrico y se agitaron por un periodo de 7 horas. Al tener todas las muestras listas, se comenzó a preparar el material para las lecturas colorimétricas.

Para poder realizar las lecturas, primero se preparó el reactivo colorimétrico denominado “Murphy Riley” (MR), conformado por dos soluciones. Para la solución A, primero se disolvió 4.3 g de molibdato de amonio en 400 mL de agua desionizada. Después, en otros 400 mL de agua se disolvieron 0.40 g de antimonio potásico, seguidamente se mezclaron con el molibdato de amonio. Por último, la mezcla se puso en un baño con hielo y se le agregó lentamente 50 mL de ácido sulfúrico concentrado

y 150 mL de agua desionizada. Al estar la solución homogenizada, se almacenó en un recipiente oscuro (por la fotosensibilidad) y se conservó a 5 °C.

Para la solución B, se disolvió 0.28 g de ácido ascórbico en 28 mL de agua (Ω), después se le agregó 22 mL de solución A para crear el agente colorimétrico MR. Una vez listo el agente, se procedió a preparar las placas para ensayos colorimétricos. En la primera columna, se prepararon las muestras estándar con ppm de 0 - 2 - 4 - 6 de P. Luego, con ayuda de una micropipeta, se agregaron 60 μ L de muestra + 46 μ L de NaOH al 5% + 54 μ L de agua (Ω) + 60 μ L de MR. Con el restante de la placa, se prepararon las muestras con el suelo de las Parcelas Morrow, conformada por 60 μ L de muestra + 39 μ L de NaOH al 5% + 61 μ L de agua (Ω) + 60 μ L de MR. Después, se dejó reposar por 15 min para que reaccione el MR. Posteriormente, se procedió a la lectura, la cual se realizó con "BioTek Gen5 data analysis". Cada una de las muestras se realizó por duplicado.

Variabilidad Espacial

Semivariograma

Para determinar la variabilidad espacial del pH y el P se desarrollaron semivariogramas. El semivariograma o variograma es la función básica que expresa, en forma de gráfica, la varianza en función a la distancia que separa las muestras, describiendo la variabilidad espacial de un fenómeno de interés. El semivariograma se calculó mediante la formula [1]:

$$y(h) = \frac{1}{2} N(h) \sum [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad [1]$$

Donde:

$y(h)$: Semivarianza para todas las muestras localizadas.

h : Distancia.

$N(h)$: El número de pares de muestras localizadas por un intervalo de distancia.

$Z(x)$: El valor de una muestra en una localización.

$Z(x+h)$: el valor de la muestra a la distancia de intervalo de distancia desde x.

Nota. Tomado de Gallardo (2006).

Ajuste de una Función al Semivariograma.

El ajuste de una función al semivariograma es de necesaria ejecución debido a que el variograma carece de una función matemática precisa. El ajuste de una función ayuda a cuantificar el grado y la escala de variación espacial. Además, permite extraer parámetros que se utilizarán en el "Kriging", siendo estos: el rango (A_0), *la pepita* (C_0) y *la meseta* ($C_0 + C$). Donde el rango representa el punto en el que la distancia no es diferente a la meseta, por lo que, marca el límite de la dependencia espacial del P y el pH del suelo. Asimismo, dependiendo de la distancia ayuda a identificar si el P y el pH son variables independientes o están correlacionada entre sí. La pepita es la varianza no explicada por el modelo, es la información no detectada entre la separación de los puntos de muestra (es una microvarianza). Al igual del rango, brinda un indicio de la dependencia espacial y el grado de variabilidad espacial del P y el pH. La meseta es la varianza máxima de la muestra (Díaz, 2002; Gallardo, 2006).

Modelos Matemáticos de Ajuste.

Los modelos de ajuste más empleados se obtuvieron mediante las siguientes Ecuaciones (2 y 3)

Modelo Esférico.

$$y(h) = \begin{cases} c \left\{ \frac{3|h|}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{|h|}{a} \right)^3 \right\} & \text{si } |h| \leq a \\ c & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad [2]$$

Donde $y(h)$ es la semivarianza en el intervalo de la distancia h . este modelo posee un comportamiento lineal a distancias de separación pequeñas cerca del origen y alcanza la meseta en la distancia a .

Modelo Exponencial.

$$y(h) = 1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a}\right) \quad [3]$$

En el modelo exponencial es el solapamiento de los bloques de forma aleatoria, variando su tamaño. Es un modelo que alcanza meseta asintóticamente, considerando un alcance práctico igual a $3a$, por lo cual el variograma alcanza un 95% de la meseta.

Modelo Gaussiano.

El modelo gaussiano es uno de los diversos modelos utilizados en la geoestadística. Es un modelo que tiende a alcanzar una meseta asintóticamente, con un alcance práctico considerado igual a $\sqrt{3}$, por lo que, el rango es la distancia a la cual el variograma alcanza un 95% de la meseta. El ajuste del modelo gaussiano se obtuvo mediante la Ecuación 4:

$$y(h) = 1 - \exp\left(\frac{-3h^2}{a^2}\right) \quad [4]$$

$y(h)$: Semivarianza en el intervalo de la distancia.

h : Distancia.

a : Distancia a la cual el valor del variograma alcanza el 95% de la meseta.

Nota. Tomado de Gallardo (2006).

Dependencia Espacial

Trangmar et al. (1986) determinaron que la pepita expresada como porcentaje de la varianza total permite comparar el tamaño relativo del efecto pepita entre las propiedades del suelo. Cambardella et al. (1994), tomando la idea principal de Trangmar y colaboradores, se estableció tres categorías de clasificación de acuerdo con el porcentaje que representa la pepita en el valor de la meseta (varianza de la muestra) con la Ecuación 5:

$$\left(\frac{C_0}{C} \times 100\right) = \% \text{ Relación Pepita/Meseta} \quad [5]$$

Donde:

C_0 = Pepita

C = Meseta

Donde un porcentaje $\leq 25\%$ presenta una dependencia espacial fuerte, entre 25 y 75% una dependencia moderada y $> 75\%$ una dependencia baja.

“Kriging” Ordinario

Para realizar los mapas con “Kriging” ordinario, primero se realizó la validación cruzada de los datos (técnica geoestadística basada en la aplicación del “Kriging”), la cual consiste en establecer una

relación entre los valores observados y sus estimados. También, se conoce la precisión de la estimación de los valores no muestreados. La validación cruzada estima cada pixel a partir de los vecinos, sin que interceda en el proceso de estimación (Abarca y Olmo, 2001; Peña, 2006).

El “Kriging” es un método geoestadístico que toma en cuenta la distancia y la geometría de la localización de las muestras, además se minimiza la varianza del error esperado. El “Kriging” es considerado óptimo, debido a que es insesgado y minimiza la varianza de la estimación. Es designado como el mejor estimador lineal insesgado de una característica a estudiar desconocida (Díaz, 2002). Los criterios de insesgado y de mínima varianza de estimación son utilizados para creación de las ecuaciones del “Kriging” (Díaz, 2002; Zavaleta, 2010).

Insesgado.

Para garantizar que el error sea igual a 0 se utilizo la Ecuación 6:

$$\sum_{\alpha=1}^n \omega_{\alpha} = 1 \quad [6]$$

Donde:

n : número de observaciones circundantes.

ω_{α} : los pesos asignados a los datos.

Nota. Tomado de Díaz (2002) y Zavaleta (2010)

Varianza de estimación.

Se utilizo la Ecuación 7 para la estimación de la varianza.

$$\sigma_{OK}^2 = \mu_{OK} - Y(x_0 - x_0) + \sum_{\alpha=1}^n \omega_{\alpha}^{OK} Y(x_{\alpha} - x_0) \quad [7]$$

Donde:

σ_{OK}^2 : Varianza de la estimación del “Kriging” ordinario.

μ : Multiplicador de Langrage.

x_{α} : Puntos muestrales vecinos.

x_0 : Punto muestral.

n : número de puntos muestrales.

ω_α : los pesos asignados a los datos.

OK: Sistema de “Kriging Ordinario”.

Nota. Tomado de Zavaleta (2010)

Análisis Estadístico

Con los datos históricos obtenidos sobre concentración de fósforo total se realizaron gráficas de series continuas en el tiempo, para visualizar los cambios en las concentraciones. Seguidamente, se realizó una regresión múltiple para determinar el efecto del tiempo, los tratamientos y la profundidad sobre las concentraciones del fósforo total. Además, se realizó una prueba de correlación de Spearman para determinar la relación entre el pH y fósforo total. También, se estimó la desviación estándar del pH y el P para calcular la variabilidad de los datos con respecto a la media. Para estos análisis se utilizó el programa estadístico “InfoStat” versión 2019, utilizando un nivel de confianza de 95% ($P \leq 0.05$).

Para la variabilidad espacial, primero se estimaron los valores máximos y mínimos, la media, la mediana, el coeficiente de variación (CV), la curtosis y el coeficiente de asimetría “Skew” como parte de la estadística descriptiva. Se realizaron semivariogramas teóricos para determinar la variabilidad espacial del pH y el fósforo total. Además, se utilizó el método de interpolación de “Kriging” ordinario para la elaboración de mapas de predicción y desviación para las variables estudiadas. Para ello, se utilizaron los paquetes “gstat”, “sp”, “ggplot2”, “DescTools”, “mapview” y “rgeos” del programa estadístico “Rstudio” versión 4.2.0.

Resultados y Discusión

Comportamiento del Fósforo Total Sobre el Tiempo

Se determino el fósforo total (P) de las subparcelas NA, NB, SA y SB desde 1904 hasta el 2021, con el objetivo de estudiar los efectos en el tiempo que los fertilizantes y la rotación de cultivos ejercieron sobre las concentraciones del P (Cuadro 1 y Cuadro 2). Los sistemas de fertilización establecidos en las Parcelas Morrow reflejan las prácticas agrícolas utilizadas en cada época (Aref y Wander, 1997). De los cuatro tratamientos establecidos, las subparcelas NA presentan las menores concentraciones de P en ambas profundidades, con una tendencia negativa. Siendo la 3NA con maíz continuo (CC), la que presentó mayor déficit. La 4NA y 5NA posee mayores concentraciones de P, sin embargo, no son significativamente diferentes ($P > 0.05$) a la 3NA (Cuadro 1). Las bajas concentraciones en el P son causadas por la falta de un sistema de fertilización y la siembra continua, donde los cultivos se ven forzados a absorber el P perteneciente a las reservas naturales del suelo. Esta condición podría ocasionar en un futuro el agotamiento del nutriente, principalmente en la producción de monocultivos, caso de la parcela 3NA (maíz-maíz sin fertilización).

Comparando los resultados entre las subparcelas 3NA, 4NA y 5NA, se determina que el establecimiento de un sistema de rotación no afecta drásticamente el P. Resultados similares son establecidos en las investigaciones de Hickman (2002) y Redel et al. (2011) donde demostraron que en suelos no fertilizados, la rotación de cultivos tiene un efecto corto sobre los nutrientes y que atribuyen el aumento en el P y MO, principalmente a la fertilización y arado entre profundidades de 0 – 20 cm. Odell et al. (1982) determinaron que la producción en las Parcelas Morrow es afectada significativamente por el sistema de fertilización, específicamente por la fertilización nitrogenada, y no por la rotación de cultivos.

El fósforo de las subparcelas NB muestra el mismo comportamiento hasta el año de 1957, donde tiene un aumento significativo en ambas profundidades (Figuras 3 y 4). Fenómeno causado por la aplicación del LNPK (L: 5 ton⁻¹; UREA: 200 L ha⁻¹; P₂O₅ 150 L ha⁻¹; K₂O 100 L ha⁻¹), fertilizante

establecido en 1955 (época donde entran los fertilizantes industriales) manteniendo una tendencia positiva hasta 1997; mismos años las subparcelas NB igualan en concentraciones a las subparcelas SB entre los 0 – 17 cm del suelo.

Cuadro 1

Concentraciones del fósforo total presente en los suelos de las subparcelas NA y NB de las Parcelas Morrow, desde 1904 hasta el 2021.

Sistema de Rotación	Años	Fósforo Total (mg P kg ⁻¹ Suelo)					
		NB			NA		
		0 - 17 cm	18 - 34 cm	Sistema de fertilización	0 - 17 cm	18 - 34 cm	Sistema de fertilización
Parcela 3 (maíz continuo (CC))	1904	446	382*		0	421*	
	1913	415	371†	Suelos no fertilizados hasta 1954	454	390†	
	1923	418	350		432	386	
	1933	388	350		422	391	Suelos no fertilizados
	1944	373	366	417	429		
	1957	398	352	LNPK desde 1955 hasta el presente	403	383	
	1967	426	384		380	377	
	1997	542	509		351	341	
	2021	500	419		380	361	
Parcela 4 (maíz – avena (COt) 1876 - 1966; maíz - soja (CSb) 1967 - presente)	1904	453	401*		511	438*	
	1913	427	405†	Suelos no fertilizados hasta 1954	494	440†	
	1923	437	382		468	397	Suelos no fertilizados
	1933	425	408		454	444	
	1944	411	420	463	435		
	1957	444	412	LNPK desde 1955 hasta el presente	418	422	
	1967	529	492		421	418	
	1997	603	490		400	396	
	2021	524	429		411	386	
Parcela 5 (Maíz - avena - heno (COtH) 1876 - 1966; maíz - soja - alfalfa (CSbH) 1967 - presente)	1904	426	406*		563	504*	
	1913	422	387†	Suelos no fertilizados hasta 1954	532	491†	
	1923	406	377		505	471	Suelos no fertilizados
	1933	409	411		500	492	
	1944	416	410	481	521		
	1957	436	419	LNPK desde 1955 hasta el presente	477	487	
	1967	535	466		476	471	
	1997	631	511		491	456	
	2021	503	438		459	453	

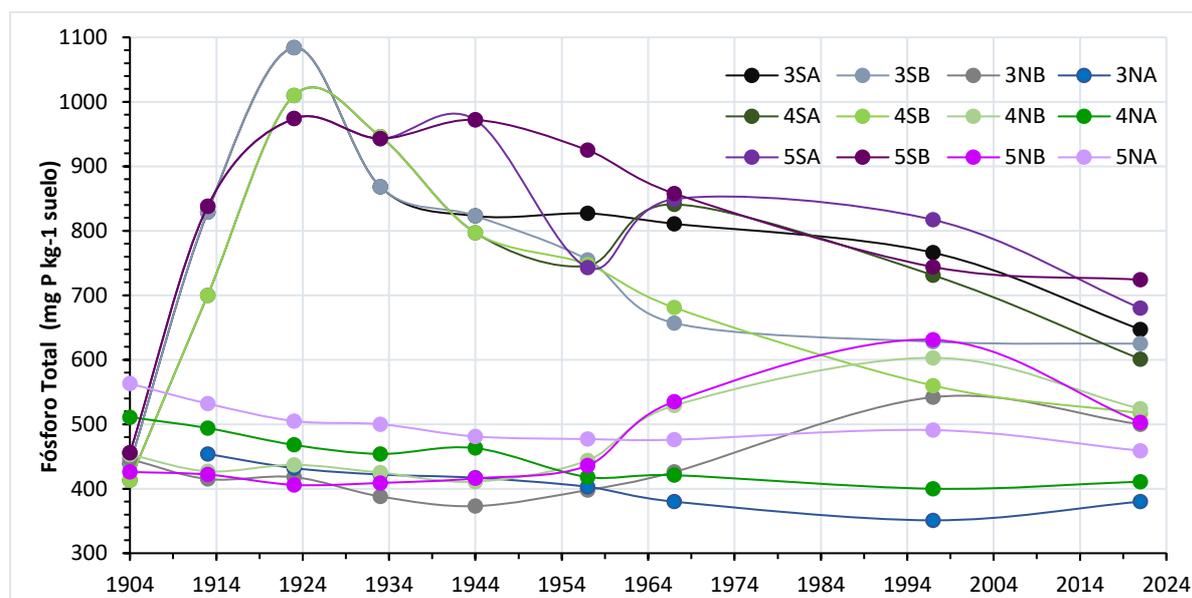
Nota. Tomado de Aref y Wander (1997) y Odell et al. (1982). Fertilizantes: MLP (estiércol +cal + roca fosfórica), LhiNPK (cal + fósforo + potación + alta cantidades de nitrógeno), LNPK (cal + nitrógeno + fósforo + potasio). * muestras tomadas a profundidades entre 18 – 46 cm; † muestras tomadas entre los 18 - 51 cm.

Para el año de 1904, las subparcelas SA y SB comienzan a ser fertilizadas con 672 kg ha⁻¹ de MLP, duplicando el P entre los 0 – 17 cm del suelo con concentraciones entre 746 – 1,084 mg P kg⁻¹ suelo (Figura 3). Entre 1904 y 1924 se realizaron aplicaciones anuales de roca fosfórica en combinación

con estiércol (1904 – 1918: 600 L ha⁻¹; 1919 – 2024: 200 L ha⁻¹), causando un aumento exponencial del P (Figura 3 y Cuadro 2). En 1933 las concentraciones del P presentan un declive entre los 0 – 17 cm de profundidad debido a la suspensión de la roca fosfórica en 1925. Además, establecen un sistema de fertilización cada 2 años para las parcelas 3 y 4, agregando 4 t de fertilizante antes de la siembra de maíz. Por otro lado, para la parcela 5 se estableció un sistema de fertilización de cada 3 años con 6 t de fertilizante, antes de la siembra de maíz. También, se aplicaron 3 t ha⁻¹ de cal cada 6 años a todas las Parcelas Morrow (Aref y Wander, 1997; DeTurk et al., 1927).

Figura 3

Concentraciones del fósforo total presente en los primeros 17 cm de profundidad del suelo de las Parcelas Morrow, desde 1904 hasta el año 2021, bajo cinco sistemas de rotación (CC-CSb-COt-COtH-CSbH) y cuatro sistemas de fertilización (MLP – LNPK – NF – LhiLNPK).



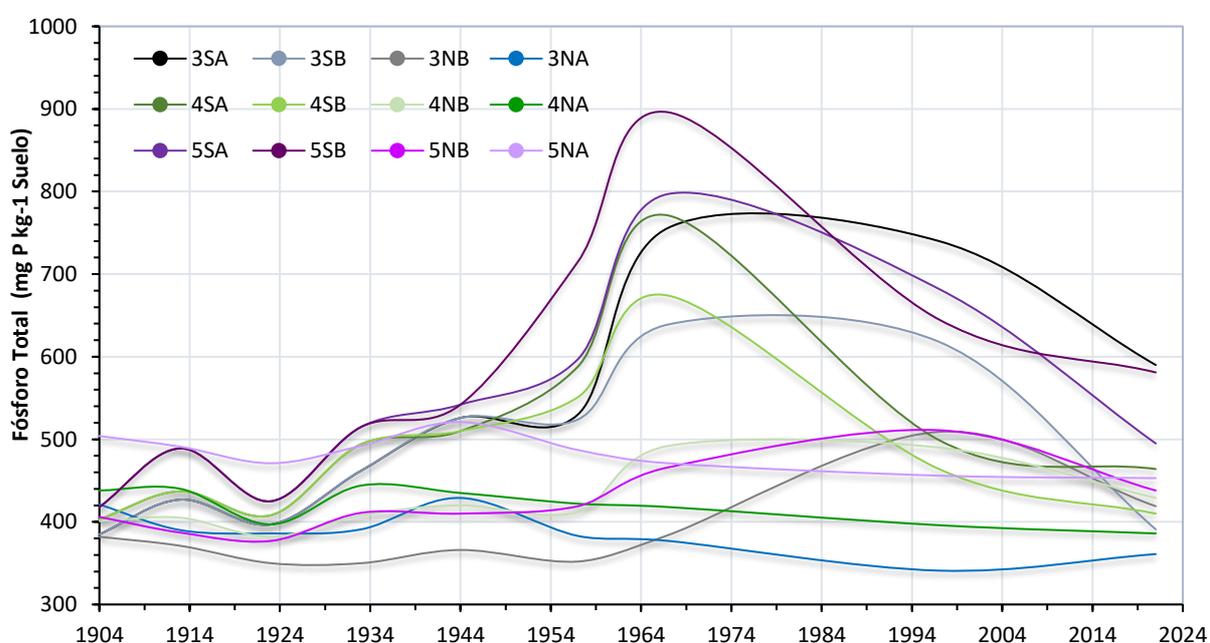
Nota. CC (maíz continuo), CSb (maíz-soja), COt (maíz – avena), COtH (maíz – avena – heno), CSbH (maíz – soja – heno); MLP (estiércol + cal + roca fosfórica), LhiLNPK (cal + fósforo + potación + alta cantidades de nitrógeno), LNPK (cal + nitrógeno + fósforo + potasio); NF (Suelos no fertilizado).

Francis et al. (1990) determinaron que el aumento en el P se debe a la actividad microbiana del suelo, proveniente de la descomposición de la MO. Un estudio realizado por Howard (1961) en las Parcelas Morrow, estableció que los suelos tratados con estiércol presentan mayores concentraciones

de P, debido a la descomposición rápida de la MO producida por la alta actividad microbiana. El tratamiento con MLP de las parcelas SA y SB mantuvo concentraciones altas dentro de los primeros 17 cm del suelo, con una tendencia positiva entre los 18 – 30 cm (Figura 4). Sin embargo, la diferencia de concentraciones es del doble entre ambas profundidades (Cuadro 2).

Figura 4

Concentraciones del fósforo total presente entre los 18 – 30 cm de profundidad del suelo de las Parcelas Morrow, desde 1904 hasta el año 2021, bajo cinco sistemas de rotación (CC-CSb-COt-COtH-CSbH) y cuatro sistemas de fertilización (MLP – LNPK – NF – LhiLNPK).



Nota. CC (maíz continuo), CSb (maíz-soja), COt (maíz – avena), COtH (maíz – avena – heno), CSbH (maíz – soja – heno); MLP (estiércol + cal + roca fosfórica), LhiLNPK (cal + fósforo + potación + alta cantidades de nitrógeno), LNPK (cal + nitrógeno + fósforo + potasio); NF (Suelos no fertilizado).

Con la aceptación de los fertilizantes industriales de N, P y K, la dinámica de las Parcelas Morrow cambia, las subparcelas NB, SA y SB cambian de sistema de fertilización. Donde las subparcelas B son fertilizadas con 150 L ha⁻¹ de P proveniente del LNPK. En cambio, la SA es fertilizada con LNPK rico en N con aplicaciones de 200 L ha⁻¹ de P (Aref y Wander, 1997; Odell et al., 1982). Con el establecimiento del LNPK en las parcelas SA (en 1967) y SB (en 1955), el P mantiene una tendencia

negativa entre los primeros 17 cm de profundidad. Por otro lado, el P entre los 18 – 34 cm presenta una tendencia positiva, manteniendo concentraciones similares a ambas profundidades. El aumento del P entre los 18 – 34 cm se atribuye a la capacidad de solubilidad de ambos fertilizantes. El P proveniente de la roca fosforizada, se asume que presenta los mismos aportes que los fertilizantes, sin embargo, es a largo plazo siendo más efectivo para cultivos perennes. Debido a las bajas concentraciones de P soluble, la pérdida por lixiviados es menor. Caso contrario al P proveniente de del LNPK, el cual brinda aportes a corto plazo y presenta una alta solubilidad (Newman, 1997).

Comparando las subparcelas entre su mismo grupo de clasificación, las concentraciones de P no poseen diferencia significativa ($P > 0.05$), independientemente el sistema de rotación. En cambio, comparando las subparcelas según su sistema de fertilización, las subparcelas SA presentan un mayor contenido de P a ambas profundidades que las demás subparcelas. Este comportamiento se atribuye a la fertilización rica en nitrógeno en combinación con la fertilización fosforada. McKenzie et al. (1992) establece que el fertilizante nitrogenado ayuda al aumento de la MO del suelo, contribuyendo indirectamente al aumento del P en todas las rotaciones. Además, este efecto es causado por la diferencia las concentraciones de P aplicadas al suelo.

Cuadro 2

Concentraciones del fósforo total presente en los suelos de las subparcelas SA y SB de las Parcelas Morrow, desde 1904 hasta el 2021

Sistema de Rotación	Años	Fósforo Total (mg P kg ⁻¹ Suelo)					
		SA			SB		
		0 - 17 cm	18 - 34 cm	Sistema de fertilización	0 - 17 cm	18 - 34 cm	Sistema de fertilización
	1904	439	385*		439	385*	
	1913	829	427†		829	427†	
	1923	1084	397	MLP hasta	1084	397	MLP hasta
	1933	868	462	1966	868	462	1954
Parcela 3 (máiz continuo (CC))	1944	823	526		823	526	
	1957	827	530		755	524	
	1967	811	756	LhiNPK	657	639	LNPK desde
	1997	766	740	desde 1967	628	618	1955 hasta
	2021	647	590	hasta el presente	625	391	el presente
	1904	413	403*		413	403*	

	1913	700	437 [†]		700	437 [†]	
	1923	1010	408		1010	408	MLP hasta
	1933	946	494	MLP hasta	946	494	1954
	1944	797	510	1966	797	510	
Parcela 4 (maíz – avena (COt) 1876 - 1966; maíz - soja (CSb) 1967 - presente)	1957	746	588		748	551	
	1967	841	771	LhiNPK	681	674	LNPk desde
	1997	731	499	desde 1967	560	464	1955 hasta
				hasta el			el presente
	2021	601	464	presente	517	410	
	1904	456	418*		456	418*	
	1913	838	489 [†]		838	489 [†]	
	1923	974	425	MLP hasta	974	425	MLP hasta
	1933	943	515	1966	943	515	1954
Parcela 5 (Maíz - avena - heno (COtH) 1876 - 1966; maíz - soja - alfalfa (CSbH) 1967 - presente)	1944	972	542		972	542	
	1957	743	597		925	715	
	1967	849	797	LhiNPK	858	896	LNPk desde
	1997	817	682	desde 1967	744	645	1955 hasta
	2021	680	495	hasta el	724	581	el presente
			presente				

Nota. Tomado de Aref y Wander (1997) y Odell et al. (1982). Fertilizantes: MLP (estiércol +cal + roca fosfórica), LhiNPK (cal + fósforo + potación + alta cantidades de nitrógeno), LNPk (cal + nitrógeno + fósforo + potasio). * muestras tomadas a profundidades entre 18 – 46 cm; † muestras tomadas entre los 18 - 51 cm.

La rotación de cultivos no genera cambios drásticos sobre el P, sin embargo, su aplicación ha demostrado grandes beneficios sobre las propiedades físicas y biológicas del suelo. Con el establecimiento de las rotaciones CSb y CSbH existe un mejor aprovechamiento de nutrientes y agua, también, la estructura a altas profundidades mejora, aumentando el movimiento del agua, la aireación y la nitrificación. Además, aumenta la MO, se aprovecha la alelopatía positiva y la fitosanidad y hay una reducción en malezas y plagas (Ballesta, 2007).

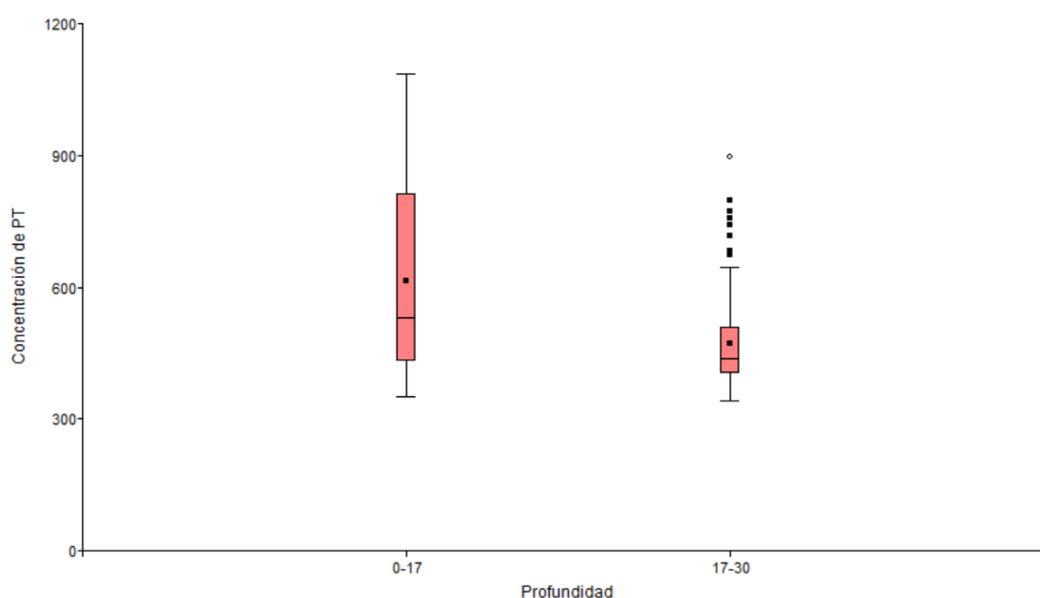
La combinación de un sistema de fertilización + rotación tiene un efecto significativo ($P < 0.000$ 1; F - valor: 22.48) sobre el P. De los cinco sistemas de rotación establecidos (Parcela 3: CC; Parcela 4: COt y CSb; Parcelas 5: COtH y CSbH), la parcela 5SA y 5SB tiene las mayores concentraciones de P, especialmente la rotación COtH + MLP. Resultados similares fueron reportados por Odell et al. (1982) en su estudio sobre las Parcelas Morrow. El aumento del P se atribuye a la MO del suelo, la cual incrementa en los periodos de siembra del heno (McKenzie et al., 1992) y los periodos de fertilización con estiércol. Por otro lado, con el cambio de fertilizante (MLP a LNPk o LhiNPK) y de cultivo (avena a soja), el P mantiene concentraciones bajas a comparación con los tratamientos anteriores,

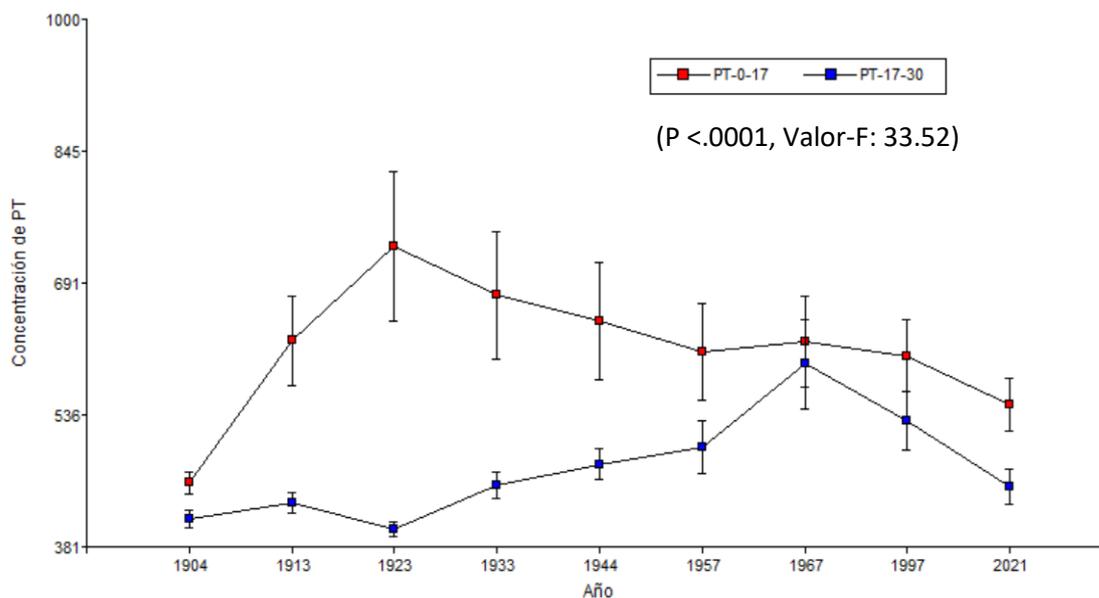
principalmente entre los 18 – 30 cm de profundidad para todas las rotaciones, siendo la parcela 4 la de mayores pérdidas del P en menor tiempo. Bullock (1992), en su investigación, concluye que las rotación de periodos cortos (CSb) destruyen la MO del suelo disminuyendo las concentraciones del P, estableciendo que el aumento de la MO es causado por la siembra de heno, pastura o césped.

La profundidad del suelo afecta significativamente ($P < 0.0001$, $F: 33.52$) (Figura 5) las concentraciones del P, determinando ser el factor más influyente con respecto a los sistemas de tratamientos. En los 12 tratamientos estudiados, el P disminuye a medida que la profundidad aumenta, reflejándose mejor en las subparcelas SA y SB entre 1904 y 1913, donde se estudia el P hasta profundidades de 51 cm. Este resultado es consistente con lo hallado por Zhang et al. (2014), quienes en su estudio espacial del P en molisoles, establecieron que el P total disminuye a mayor profundidad, donde las mayores concentraciones se encuentran entre los 0 – 20 cm del suelo. También, encontraron que el P disponible presenta un comportamiento contrario, con un aumento a mayor profundidad. Haruna y Nkongolo (2020) en su investigación observaron el mismo comportamiento para el P, solamente que muestran la mayor concentración entre los 0 – 10 cm de profundidad.

Figura 5

Media de la concentración de fósforo total para cada profundidad





El P es un nutriente fuertemente asociado al suelo, siendo su principal mecanismo de movimiento la difusión (Prince, 2006). Lewis y Quirk (1967) determinaron que los cambios en las concentraciones del P provocan un aumento en el coeficiente de difusión; cambio obtenidos por la fase líquida presente en la fertilización fosforada. Por lo que, las concentraciones del P entre los 18 – 34 cm de profundidad en las Parcelas Morrow son afectadas por la baja tasa de fósforo soluble presente en el fertilizante. Por otra parte, Hao et al. (2002) en su investigación establece que el movimiento del P disminuye en suelos tratados con cal para corrección de pH. Por tanto, el movimiento del P en el suelo de las Parcelas Morrow se puede ver afectado por las aplicaciones de cal y el material parental del suelo, siendo este un suelo calcáreo. En suelos básicos existe la reducción en la disponibilidad del H_2PO_4^- debido a la precipitación de sales de fósforo al reaccionar con cationes (Fernández, 2007).

Jobbágy y Jackson (2001) determinaron que el P es el nutriente con menor distribución vertical, concentrándose entre los 0 – 20 cm de profundidad, convirtiéndose en un factor limitante para el desarrollo de los cultivos. Además, indican que la distribución vertical de los nutrientes refleja el grado de limitación que el cultivo impone. Erbach (1982) determinó un aumento en el P entre los 0 – 25 cm de profundidad en una rotación maíz-soja (CSb). Por otro lado, la producción convencional de

maíz (CC) muestra principalmente un aumento entre los 0 - 7.5 cm de profundidad. En las Parcelas Morrow todas las rotaciones de cultivos presentan las mayores concentraciones del suelo entre los 0 - 17 cm de profundidad. La preparación del suelo con el uso de labranza ayuda a distribuir el P a mayores profundidades; la distribución del nutriente es más homogénea dentro de la profundidad del arado. Asimismo, los cultivos arrastran por medio de las raíces los nutrientes a los demás horizontes, sin embargo, el transporte depende de la disponibilidad del mismo (Jobbágy y Jackson, 2001).

De los tres factores estudiados, el tiempo no presentó diferencias significativas ($P = 0.1183$, $F = 1.63$) sobre la concentración del P. Desde 1904 hasta el año 2021 las concentraciones del P y el movimiento de este, en los suelos de las Parcelas Morrow han sido afectados principalmente por los diferentes tratamientos aplicados. El tiempo ejerce un efecto nulo específicamente en las subparcelas SA, SB y NB, donde el P perdido es restaurado por la aplicación de fertilizantes. En cambio, en suelos no fertilizados, como las subparcelas NA, entender el agotamiento del P respecto al tiempo, es esencial para comprender la rapidez en que se agota el nutriente proveniente de las reservas naturales, además de determinar la duración de una producción agrícola. En las investigaciones a largo plazo se ha observado que el mantenimiento de los suelos se ve afectado directamente por las prácticas agrícolas implementadas. El buen establecimiento de prácticas agrícolas mantiene o mejora las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo (Dick, 1992).

Relación del pH Sobre el Fósforo Total

Se determinó el P y el pH de las subparcelas NA, SA y SD para el año 2021 con el objetivo de estudiar el efecto que la fertilización y rotación de cultivos sobre las concentraciones del P y el comportamiento del pH, además de estudiar la dependencia lineal entre el pH y el P. El pH y el P poseen una correlación positiva débil, pero significativa ($r: 0.27$, $P < 0.0001$); indicando que un cambio en el pH en el suelo ejercerá una fuerza que afectará las concentraciones del P. Dentro de los tratamientos establecidos, las subparcelas NA (no fertilizadas) presentan las concentraciones de P más bajas (3NA: 491.80 ± 64.20 mg P kg^{-1} suelo; 4NA: 491.40 ± 59.73 mg P kg^{-1} suelo; 5NA: 476.74 ± 71.84

mg P kg⁻¹ suelo). Donde la subparcela 4NA presenta la desviación estándar más homogénea del grupo, con una variabilidad por debajo o encima de 59.73 mg P kg⁻¹ suelo de la media (491.40 mg P kg⁻¹ suelo).

Por otra parte, La subparcela 5NA presenta la desviación más heterogénea con 71.84 mg P kg⁻¹ suelo por sobre o debajo la media (Cuadro 3). Las subparcelas NA presentan suelos moderadamente ácidos con pH entre 5.88 – 5.96; contrario al P, el pH presenta una desviación baja para todas las subparcelas con valores que oscilan entre 0.16 y 0.33 por sobre la media (Cuadro 3). Las bajas concentraciones del P son causadas por la falta de un sistema de fertilización, sin embargo, son suelos que presentan concentraciones consideradas altas para ser las reservas naturales. Uno del causante de tener estas concentraciones es el efecto espacial que ejercen las subparcelas vecinas (Cuadro 5 y Figura 8) por factores naturales y antropogénicos.

Cuadro 3

Media y Desviación Estándar del pH y Fósforo Total para nueve tratamientos de las Parcelas Morrow, entre 0 – 15 cm de profundidad, para el año 2021.

Parcelas	Tratamiento	Fertilizante	pH		Fósforo Total (mg P kg ⁻¹ suelo)	
			Media ± Desviación Estándar	Media ± Desviación Estándar	Media ± Desviación Estándar	Media ± Desviación Estándar
3 - CC	NA	NO	--	5.956 ± 0.20	491.80 ± 64.20	
	SA	LhiNPK	200 L ha ⁻¹	6.406 ± 0.34	625.46 ± 66.13	
	SD	MLP	4 t	6.264 ± 0.29	586.77 ± 76.54	
4 - CSb	NA	NO	--	5.875 ± 0.16	491.40 ± 59.73	
	SA	LhiNPK	200 L ha ⁻¹	5.987 ± 0.20	576.60 ± 81.42	
	SD	MLP	4 t	5.964 ± 0.29	539.03 ± 54.13	
5 - CSbH	NA	NO	--	5.986 ± 0.33	476.74 ± 71.84	
	SA	LhiNPK	200 L ha ⁻¹	6.671 ± 0.38	622.33 ± 105.05	
	SD	MLP	6 t	6.132 ± 0.29	625.14 ± 68.79	

Nota. Rotaciones: CC: maíz continuo; CSb: maíz-soja; CSbH: maíz-soja-alfalfa. *Fertilizantes: NO: No fertilizado; MLP (estiércol + cal + roca fosforica), LhiNPK (cal + fósforo + potación + alta cantidades de nitrógeno), LhiNPK (cal + altas concentraciones de nitrógeno + fósforo + potasio).

Las parcelas 3SA, 4SA y 5SA (las tres fertilizadas con LhiNPK) presentan las mayores concentraciones de P (625.46 ± 66.13 mg P kg⁻¹ suelo, 576.60 ± 81.42 mg P kg⁻¹ suelo, 622.33 ± 105.05 mg P kg⁻¹ suelo respectivamente), con un pH promedio que oscila entre 5.99 (moderadamente ácido) – 6.67 (ligeramente ácido). Al igual que las sub-parcelas NA, las SA presentan una desviación estándar

baja entre 0.20 - 0.38 para el pH. Sin embargo, la subparcela 5SA posee la desviación más alta para el P y el pH entre todas las subparcelas estudiadas. El P obtuvo una media de 105.05 mg P kg⁻¹ suelo por sobre o debajo de la media, siendo esta de 622.33 mg P kg⁻¹ suelo. Mientras que, el pH obtuvo una desviación de 0.38 por sobre o debajo de 6.6 como la media (Cuadro 3). La alta desviación se atribuye a la alta variabilidad espacial (Cuadro 5 y Figura 8) que existen en el área de la parcela 5 para el P y pH y por la existencia de posibles datos lejos de la media.

La acidificación de las subparcelas SA se atribuye al uso de fertilizantes nitrogenados a base de urea (Rasmussen et al., 1998). Los fertilizantes nitrogenados generan acidez en los suelos debido a la liberación de iones de hidrógeno (H⁺), donde la urea por cada mol de N produce dos moles de H⁺ (Baldoncini, 2015; Hickman, 2002). Riedell et al. (1998) en su investigación centrada en la rotación de cultivos en suelos francos, establece que los suelos ácidos son causados por la fertilización nitrogenada en rotaciones con alta frecuencia de maíz, creando cambios bruscos en el pH. Zuber et al. (2015) determinaron que un suelo con una producción CC posee pH más ácidos, a comparación con producciones rotativas.

Las subparcelas SD contienen entre 539.03 ± 54.13– 625.14 ± 68.69 mg P kg⁻¹ suelo, con pH entre 5.96 ± 0.29 y 6.26 ± 0.29 (moderadamente ácidos). La desviación estándar de las subparcelas SD presentan el mismo comportamiento de las subparcelas NA. Al igual que las subparcelas SA, las concentraciones del P se deben a la fertilización con MLP. El estiércol está compuesto por P orgánico e inorgánico, donde los ortofosfatos constituyen entre el 45 y 90% del P presente en el estiércol, convirtiéndose en una fuente importante del nutriente (Rayne y Aula, 2020). Basándose en una colección de valores publicados en el informe de Aref y Wander (1997), se estima que el estiércol de las Parcelas Morrow contiene 7.23 g kg⁻¹ de P.

El estiércol es un fertilizante que puede aumentar o disminuir el pH del suelo (Rayne y Aula, 2020). Diversas investigaciones han mostrado un aumento en el pH por causa de la aplicación de estiércol de conejo, bovino, gallinaza y cerdaza. Whalen et al. (2000) centran su investigación en el

aumento del pH causado por el estiércol bovino, donde obtuvo un aumento entre 0.8 y 1.2 en el pH del suelo. El aumento es atribuido a los carbonatos de calcio, al bicarbonato y los aniones orgánicos presentes en el estiércol que neutralizan los iones de H^+ (Eghball et al., 1996; Giola et al., 2012; Rayne y Aula, 2020). En cambio, la acidificación causada por el estiércol se atribuye a la nitrificación y el aumento de la conductividad eléctrica, además, el pH inicial y el grado de descomposición de los residuos ejerce un efecto acidificante sobre los suelos (Rayne y Aula, 2020; Tang y Yu, 1999). Ndayegamite y Côte (1989) establecen que el aumento o la disminución del pH por parte del estiércol depende de la calidad de los alimentos del animal y del tipo de suelo. Sin embargo, en este estudio, no se pueden atribuir los cambios en el pH del suelo a la aplicación de estiércol, dado que la información disponible no es suficiente para soportar este aspecto.

Dentro de las subparcelas estudiadas las mayores concentraciones del P se encuentran en los suelos ligeramente ácidos con pH que oscilan entre 6.13 y 6.67. Esto muestra una tendencia favorecedora para el aumento en las concentraciones del P. Contrario a los suelos con $pH < 6$ donde se puede observar menores concentraciones de P.

Variabilidad Espacial

Los valores del pH oscilaron entre 5.15 (fuertemente ácido) y 7.37 (Ligeramente alcalino) con una media de 6.14 (ligeramente ácido). Los suelos presentan un pH mínimo considerado extremo debido a que es poco común en los molisoles, sin embargo, es un valor esperado en los suelos de la investigación debido a la explotación que ha tenido durante 145 años. Al igual, que el mínimo, el valor máximo se considera fuera de lo normal debido a que, por naturaleza, estos suelos poseen un pH ligeramente ácido dentro de los primeros 38 cm de profundidad. Además, los suelos en producción continua se acidifican con el tiempo. En las investigaciones de Fenton (1983) y Kravchenko et al. (2011), se reportan pH entre 6.6 (ligeramente ácidos) y 8.6 (fuertemente alcalino) para molisoles de Estados Unidos, Ucrania y China.

Cuadro 4

Estadística descriptiva del pH y fósforo total de las subparcelas NA, SA y SD de Parcelas Morrow.

Parámetros	Min	Max	CV	Media	Mediana	Kurt.	SKEW.
pH	5.156	7.372	6%	6.135	6.079	0.24	0.51
P (mg P kg ⁻¹ suelo)	374.23	829.63	17%	559.47	557.22	- 0.75	0.15

Nota. Min (valor mínimo); Max (valor máximo); CV (coeficiente de variación); Kurt (curtosis); SKEW (coeficiente de asimetría)

De acuerdo, al valor del índice de P desarrollado por “Virginia Department of Conservation and Recreation” (2014), las Parcelas Morrow presentan concentraciones extremadamente altas (> 100 mg P kg⁻¹ suelo), con valores entre 374.23 y 829.63 mg P kg⁻¹ suelo (Cuadro 4). Las altas concentraciones se atribuyen a una sobre fertilización del suelo, realizada entre 1904 hasta 1924, donde MLP era agregado al suelo anualmente. Los suelos ricos en fósforo necesitan años de continua producción libre de fertilización para reducir eficazmente las concentraciones de P en el suelo (Mullins, 2009).

Bai et al. (2018) determinaron que el pH de los suelos es afectado principalmente por el material parental, el tipo de suelo, el uso de fertilizantes y el uso de cal. En las Parcelas Morrow la acidificación se atribuye a la fertilización con urea en las subparcelas con LhiNPK, donde la urea toma una forma nítrica (liberando H⁺) para ser asimilada por la planta (Ginés y Mariscal, 2002). También, la acidificación de los suelos es causada por el continuo uso de los suelos; al respecto, Silva et al. (2001) establecen que el uso del suelo afecta el pH, asociando la reducción del pH con el bajo contenido de base en el suelo. Por otro lado, los suelos de las Parcelas Morrow son de origen calcáreo, suelos destacados por tener una mayor disociación del hidróxido de calcio y la producción de iones de hidróxido (OH⁻), obteniendo suelos naturalmente alcalinos con pH entre 7- 8.3 (Pérez, 2015). Por lo que, se asume que el pH inicial de las parcelas naturalmente era alcalino y por el uso histórico de las Parcelas Morrow el pH se ha visto afectado. Sin embargo, no se afirma debido a que no existen estudios del suelo para los primeros años de las Parcelas Morrow por inexistencia de muestras.

De acuerdo con la investigación de Wilding et al. (2015) el coeficiente de variación (CV) del pH (6 %) se considera como un CV bajos dado que es menor a un 10%, mientras que el P presenta un CV

moderado ($10 > 0 < 20\%$) de 17%. Valores similares fueron expuestos por Robertson et al. (1993) en una investigación centrada en la variabilidad espacial en suelos con producción a largo plazo de 33 años, el cual presenta un CV de 3% para el pH, sin embargo, el P presenta un CV alto ($25.7 > 20\%$). Similar a la investigación de Gao et al. (2019) donde el P presenta un CV alto ($37 > 20\%$), indicando una alta variabilidad. Por medio de la curtosis y el coeficiente de asimetría SKEW se determinó una distribución normal y simétrica para ambos parámetros, donde el P presenta una curtosis negativa (-0.75) indicando una presencia de valores atípicos (Cuadro 4).

Semi-variogramas

El modelo experimental gaussiano es el que mejor se ajustó al pH y P del suelo de las Parcelas Morrow. Ambos parámetros presentan un rango de correlación espacial corto con 29.9 y 33.5 m para el pH y P respectivamente (Cuadro 5 y Figura 6). El pH y P no presentan un efecto pepita puro (> 0); sin embargo, presentan diferentes grados de dependencia espacial. El P presenta una dependencia alta con 10.41%, por otro lado, el pH presenta una dependencia espacial moderada con un 34.84%. La alta dependencia espacial del P indica una alta sensibilidad del nutriente a factores extrínsecos (Roger et al., 2014), tomando la fertilización como un factor determinante. Page et al. (2005) determinaron que existen mayor variabilidad espacial en zonas fertilizadas. También, Silva et al. (2001) establecieron que el pH y P en suelos "Aquic Argiudolls" son variables altamente sensibles a los efectos de los tratamientos establecidos.

Cuadro 5

Modelo de los semivariogramas para el pH y fósforo total

Parámetros	Modelo	Pepita	Meseta	Rango (m)	$(P/M) * 100$	r^2_{vc}
pH	Gaussiano	0.046	0.132	29.9	34.84 %	0.23
P	Gaussiano	1709	14,415	33.5	10.41 %	0.44

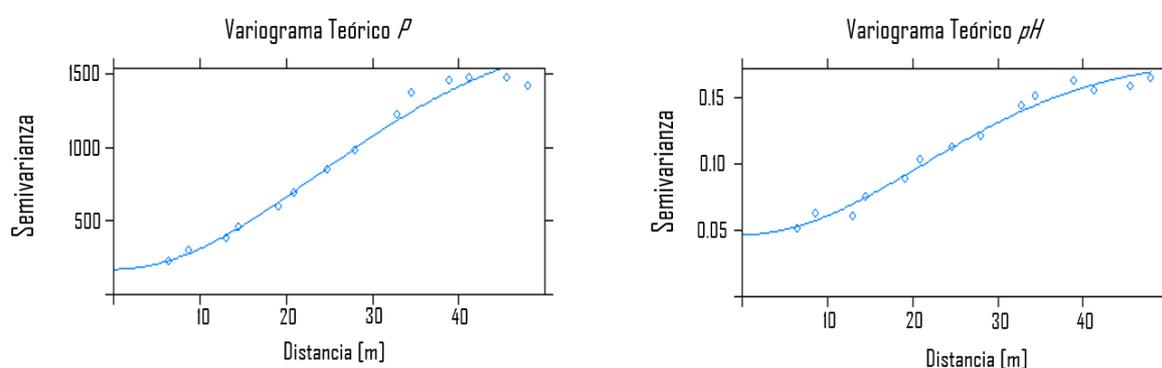
Nota. r^2_{vc} (coeficiente de determinación de la variable cruzada); $(P/M) * 100$ (varianza de la muestra)

Negassa et al. (2019) en su investigación centrada en la variabilidad espacial a corta escala, determinaron una correlación espacial menores a las estimadas. Donde el pH, con una dependencia

espacial baja, posee una correlación espacial baja en un rango de 10 m dentro de los primeros 10 cm de profundidad del suelo. Asimismo, el P presenta una correlación espacial baja de 5 m, con una dependencia espacial alta; ambos parámetros demostraron tener una alta variabilidad espacial.

Figura 6

Semivariogramas de los parámetros de pH y P para los suelos de las Parcelas Morrow a una profundidad de 15 cm



La variabilidad espacial del pH y P en los suelos es afectada por diversos factores naturales, (factores formadores del suelo) y antropogénicos (prácticas agrícolas), particularmente, en función a la fertilización. En la mayoría de los casos, la variabilidad ocupa distancias relativamente largas, muchas veces relacionada con el clima, el gradiente y el orden taxonómico del suelo. Por otro lado, la variabilidad, también ocurre por levantamientos topográficos que afectan la movilidad hídrica en el suelo (*Soil Physics Companion*, 2001). Gao et al. (2019) determinó que el uso del suelo afecta significativamente el comportamiento espacial del P.

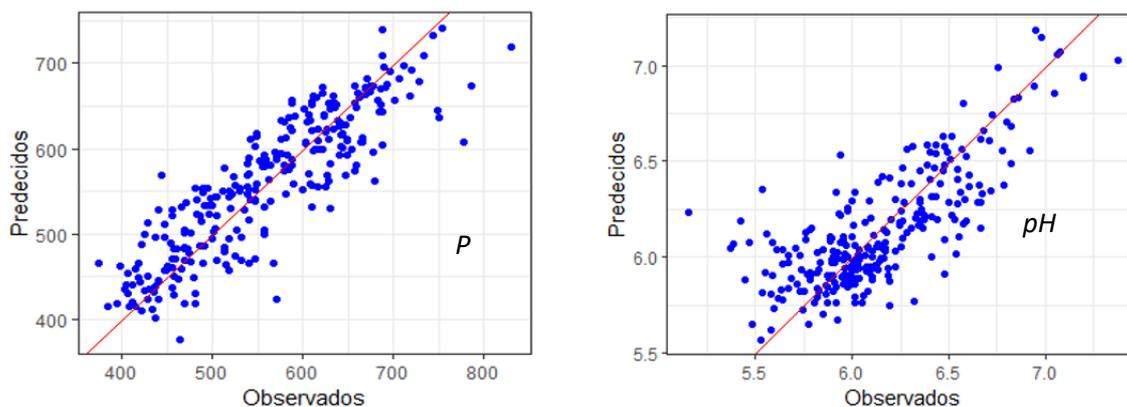
“Kriging” Ordinario

Predicción de la Distribución Espacial

El coeficiente de determinación de la variable cruzada (r^2_{vc}) de ambos parámetros (Cuadro 5) indican una precisión moderada para el P con 0.44, y una precisión baja para el pH con 0.23. En la Figura 7, se ilustran los resultados, donde los valores punteados muestran que, a mayor distancia del valor lineal, menor es la precisión, afectando así la predicción de los mapas.

Figura 7

Validación cruzada de los parámetros de pH y P para los suelos de las Parcelas Morrow a una profundidad de 15 cm



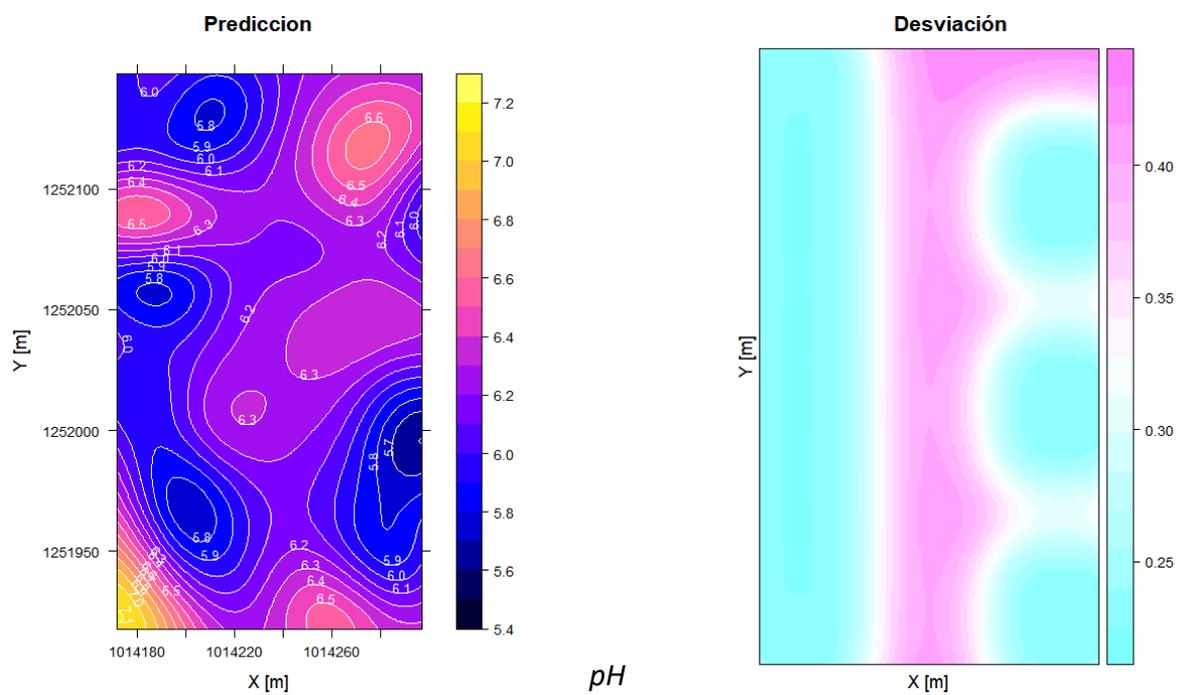
En la Figura 7, se presentan cuatro mapas (dos de predicción y dos de desviación) correspondientes a los parámetros de pH y P, creados usando “Kriging” ordinario. Los mapas de predicción permiten estimar e ilustrar los posibles resultados de los puntos no muestreados. Por otro lado, el mapa de desviación determina e ilustra el grado de error, ayudando a demostrar la exactitud del “Kriging”, donde valores cercanos o iguales a 0 están ilustrados con un azul celeste intenso, concentrado en los puntos de muestreo. Comparando los mapas de desviación del P y el pH, el pH presenta una desviación alta en la región media (zona no muestreada) entre 0.40 – 0.45 (rango de desviación no presente en las muestras de pH tomadas para el año 2021 [Cuadro 3]). El alto grado de error se atribuye al comportamiento del pH en el suelo, el cual toma un comportamiento menos sistemático (como se observa en el mapa de predicción) que el P (Figura 8); asimismo posee una variabilidad espacial a un menor rango del P (Cuadro 5).

El pH y P presentan una variabilidad espacial alta dentro de un terreno pequeño (0.3 ha). La variabilidad se atribuye a las diferentes prácticas agrícolas que han sido aplicadas en las Parcelas Morrow, combinado con el clima, relieve, temperatura, microorganismos y material parental. Ambos mapas de predicción ilustran los resultados del Cuadro 3, un ejemplo son las zonas con pH neutros

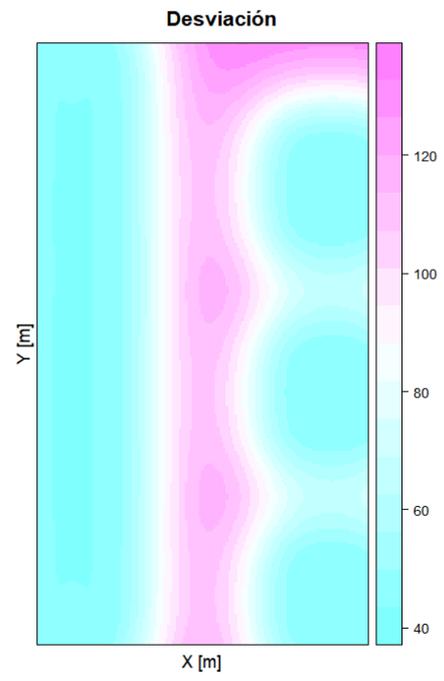
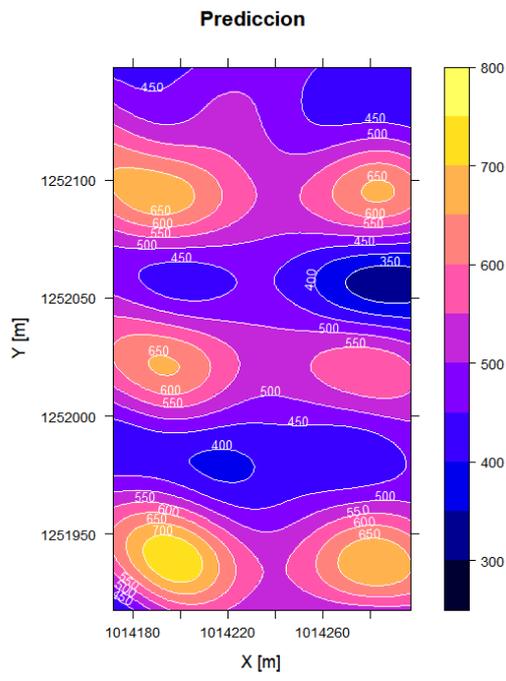
que presentan concentraciones más altas de P (caso de la parcela 5). Se puede observar las posibles correlaciones que existen dentro del área estudiada. Por otro lado, el mapa de predicción del P muestra concentraciones de las parcelas no muestreadas, relativamente similares a las expuestas en el Cuadro 1 y 2 para el año 2021, presentando una desviación media entre los 60 y 80 m.

Figura 8

Mapas de predicción y desviación para el pH y fósforo total presente en los primeros 15 cm de profundidad del suelo de las parcelas Morrow.



pH



P

Conclusiones

El estudio en el tiempo demostró que el fósforo se ve influenciado directamente por la combinación de un sistema de fertilización, rotación de cultivos y por la profundidad. La profundidad mostró ser un factor determinante en el contenido de fósforo, donde a mayor profundidad menor es la concentración, lo cual puede afectar negativamente el desarrollo de los cultivos futuros. Por otro lado, el factor tiempo resulta ser un indicativo en la velocidad de agotamiento del P proveniente de las reservas naturales.

La fertilización y la rotación de cultivos afecta en diferentes aspectos el fósforo y el pH del suelo. La fertilización aumenta las concentraciones del fósforo y, dependiendo del tipo de fertilizantes, el pH tendrá un comportamiento ácido o alcalino. Mientras que, la rotación de cultivos está estrechamente ligada al comportamiento que tomará el P sobre el suelo. Dependiendo del sistema de rotación establecido las propiedades físicas y biológicas del suelo varían. En suelos con condiciones físicas favorables el movimiento y disponibilidad del P es beneficiada. Por otro lado, las rotaciones continuas de maíz o maíz-soja favorecen la acidificación de los suelos causando una disminución en las concentraciones del fósforo.

El fósforo mostró ser ligeramente dependiente del pH. Los suelos moderadamente ácidos poseen las concentraciones más bajas, disminuyendo las concentraciones del P. En cambio, los suelos que presentan un pH ligeramente ácido poseen las mayores concentraciones del P en el suelo de las Parcelas Morrow.

El fósforo total y el pH presentan una fuerte dependencia espacial a una distancia máxima de 33.5 y 29.9 m respectivamente, señalando que existe una variabilidad espacial alta dentro de los 0.3 ha del experimento, causada principalmente por los diferentes tratamientos que han sido establecidos (fertilización, encalado, rotación de cultivos, etc.).

Recomendaciones

Realizar un estudio del pH en el tiempo para determinar la velocidad de acidificación de los suelos y la influencia que el pH tuvo sobre el comportamiento del P.

Realizar un listado de todas las prácticas agrícolas realizadas en cada subparcela, para tener un mejor entendimiento y estudio sobre los factores que afectan al P y el pH.

Investigar como los factores formadores del suelo (clima, material parental, tiempo, relieve y organismos) afectan la variabilidad espacial y temporal del P y el pH.

Estudiar el efecto de la profundidad sobre el valor nutricional de los cultivos.

Realizar una medición del suelo erosionado y del P lixiviado para, posteriormente, realizar un estudio de variabilidad espacial.

Evaluar las propiedades físicas (CE, STD, etc.) y biológicas (actinomicetos, bacterias, enzimas, etc.) del suelo para conocer el efecto en el comportamiento del fósforo total.

Referencias

- Abarca, F. y Olmo, M. (2001). Descriptor Textural Geoestadístico Basado en Validación Cruzada: Aplicación a la Clasificación de imágenes. *Teledetección, Medio Ambiente Y Cambio Global*. <http://www.aet.org.es/congresos/ix/lleida101.pdf>
- Aref, S.; Wander, M. M. (1997). *Long-Term Trends of Corn Yield and Soil Organic Matter in Different Crop Sequences and Soil Fertility Treatments on the Morrow Plots*, 62, pp. 153–197.
- Bai, Z., Caspari, T., Gonzalez, M. R., Batjes, N. H [Niels H.], Mäder, P., Bünemann, E. K., Goede, R. de, Brussaard, L., Xu, M., Ferreira, C. S. S., Reintam, E., Fan, H., Mihelič, R., Glavan, M. y Tóth, Z. (2018). Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 265, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.028>
- Baldoncini, A. M. (2015). *Efectos de la aplicación de fertilizantes sobre el pH de suelos serie Oncativo* [Córdoba]. rdu.unc.edu.ar. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/1849>
- Balemi, T. y Negisho, K. (2012). Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(3), 547–561. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162012005000015>
- Ballesta, A. (2007). *Efecto de la alfalfa (Medicago sativa L.) y del abonado nitrogenado en el maíz (Zea mays L.) y el trigo (Triticum aestivum L.) en una rotación Alfalfa-Maíz-Trigo en regadío* [Doctoral]. Universidad de Lleida, Lérida, España.
- Batjes, N. H [N. H.] (1997). A world dataset of derived soil properties by fao?unesco soil unit for global modelling. *Soil Use and Management*, 13(1), 9–16. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1997.tb00550.x>
- Bullock, D. G. (1992). Crop rotation. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 11(4), 309–326. <https://doi.org/10.1080/07352689209382349>
- Cambardella, C. A [C. A.], Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L [D. L.], Turco, R. F. y Konopka, A. E. (1994). Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), 1501–1511. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- Campbell, C. A. (1978). Chapter 5 Soil Organic Carbon, Nitrogen and Fertility. En M. Schnitzer y S. U. Khan (Eds.), *Developments in Soil Science: Soil Organic Matter* (Vol. 8, pp. 173–271). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70020-5](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70020-5)
- Clark, M. S., Horwath, W. R., Shennan, C. y Scow, K. M. (1998). Changes in Soil Chemical Properties Resulting from Organic and Low-Input Farming Practices. *Agronomy Journal*, 90(5), 662–671. <https://doi.org/10.2134/agronj1998.00021962009000050016x>
- Crookston, R. K., Kurlle, J. E., Copeland, P. J., Ford, J. H. y Lueschen, W. E. (1991). Rotational Cropping Sequence Affects Yield of Corn and Soybean. *Agronomy Journal*, 83(1), 108–113. <https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300010026x>
- Daniels, M. B., Delaune, P., Moore, P. A., Mauromoustakos, A., Chapman, S. L. y Langston, J. M. (2001). Soil phosphorus variability in pastures: Implications for sampling and environmental

- management strategies. *Journal of Environmental Quality*, 30(6), 2157–2165. <https://doi.org/10.2134/jeq2001.2157>
- DeTurk, E., Bauer, F. y Smith, L. (1927). Lessons from the Murrum Plots 1927, University of Illinois.
- Díaz, M. (2002). *Geoestadística aplicada*. <http://www.esmg-mx.org/media/courses/geoestadistica/geoestadistica.pdf>
- Dick (1992). A review: long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 40(1-4), 25–36. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(92\)90081-L](https://doi.org/10.1016/0167-8809(92)90081-L)
- Dimitri, C., Effland, A. y Conklin, N. C. (2005). *The 20th Century Transformation of U.S. Agriculture and Farm Policy* (núm. 1476-2016-120949). <https://ageconsearch.umn.edu/record/59390> <https://doi.org/10.22004/ag.econ.59390>
- Eghball, B., Binford, G. D. y Baltensperger, D. D. (1996). Phosphorus Movement and Adsorption in a Soil Receiving Long-Term Manure and Fertilizer Application. *Journal of Environmental Quality*, 25(6), 1339–1343. <https://doi.org/10.2134/jeq1996.00472425002500060024x>
- Erbach, D. C. (1982). Tillage for Continuous Corn and Corn-Soybean Rotation. *Transactions of the ASAE*, 25(4), 906–911. <https://doi.org/10.13031/2013.33638>
- Fenton, T. E. (1983). Chapter 4 Mollisols. En L. P. Wilding, N. E. Smeck y G. F. Hall (Eds.), *Developments in Soil Science: 11B. The soil orders* (Vol. 11, pp. 125–163). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70615-9](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70615-9)
- Fernández, M. T. (2007). Fósforo: amigo o enemigo. *ICIDCA. Sobre Los Derivados De La Caña De Azúcar*, 41(2), 51–57. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223114970009.pdf>
- Francis, C. A., Flora, C. B. y King, L. D. (Eds.). (1990). *A Wiley-Interscience publication. Sustainable agriculture in temperate zones*. Wiley. <http://www.loc.gov/catdir/description/wiley032/89039543.html>
- Gallardo, A. (2006). *Geostadística. Ecosistemas*, 15(3). <http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/161>
- Gao, X., XIAO, Y., Deng, L., Li, Q., Wang, C., Li, B., Deng, O. y Zeng, M. (2019). Spatial variability of soil total nitrogen, phosphorus and potassium in Renshou County of Sichuan Basin, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(2), 279–289. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62069-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62069-6)
- García, Y. L., Sánchez, Y. E., Orozco, M. B. y Fernández, E. (2020). Variabilidad espacial del fósforo asimilable en un suelo Ferrasol cultivado con caña de azúcar. *Revista Científica Agroecosistemicas*, 8(3), 77–82.
- George, T. S., Hinsinger, P. y Turner, B. L. (2016). Phosphorus in soils and plants – facing phosphorus scarcity. *Plant and Soil*, 401(1-2), 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2846-9>
- Ginés, I.; Mariscal, S. (2002). *Incidencia de los fertilizantes sobre el pH del suelo*. Fertiberia; E.T.S.I. Agrónomos (UPM). <https://oa.upm.es/3176/>
- Giola, P., Basso, B., Pruneddu, G., Giunta, F. y Jones, J. W. (2012). Impact of manure and slurry applications on soil nitrate in a maize–triticale rotation: Field study and long term simulation analysis. *European Journal of Agronomy*, 38, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.12.001>

- Guan, F., Xia, M., Tang, X. y Fan, S. (2017). Spatial variability of soil nitrogen, phosphorus and potassium contents in Moso bamboo forests in Yong'an City, China. *CATENA*, 150, 161–172. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.017>
- Hao, X., Cho, C. M., Racz, G. J. y Chang, C [C.] (2002). Chemical retardation of phosphate diffusion in an acid soil as affected by liming. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 64(3), 213–224. <https://doi.org/10.1023/A:1021470824083>
- Haruna, S. I. y Nkongolo, N. V. (2020). Influence of Cover Crop, Tillage, and Crop Rotation Management on Soil Nutrients. *Agriculture*, 10(6), 225. <https://doi.org/10.3390/agriculture10060225>
- Haynes, R. J. y Naidu, R. (1998). Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: A review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 51(2), 123–137. <https://doi.org/10.1023/A:1009738307837>
- Hickman, M. V. (2002). Long-term Tillage and Crop Rotation Effects on Soil Chemical and Mineral Properties. *Journal of Plant Nutrition*, 25(7), 1457–1470. <https://doi.org/10.1081/PLN-120005402>
- Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. *Plant and Soil*, 237(2), 173–195. <https://doi.org/10.1023/A:1013351617532>
- Holtan, H., Kamp-Nielsen, L. y Stuanes, A. O. (Eds.). (1990). *Phosphorus in Soil, Water and Sediment: An Overview*. In G. Persson & M. Jansson (Eds.), *phosphorus in freshwater ecosystems: proceedings of a symposium held in*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3109-1_3
- Howard, L. (1961). *The Morrow Plots University of Illinois*.
- Jaramillo, D. (2012). Variabilidad espacial del suelo: bases para su estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 1(1), 73–87. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rfc/article/view/49004>
- Jaramillo, D., Gonzalez, H. y Álvarez, F. (2008). Variabilidad espacial de algunas propiedades físico-mecánicas de los suelos de textura gruesa. *Revista CES Medicina Veterinaria Y Zootecnia*, 3(2), 10–19.
- Jobbágy, E. G. y Jackson, R. B. (2001). The distribution of soil nutrients with depth: Global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*, 53(1), 51–77. <https://doi.org/10.1023/A:1010760720215>
- Karlen, D. L [Douglas L.], Hurley, E. G., Andrews, S. S., Cambardella, C. A [Cynthia A.], Meek, D. W., Duffy, M. D. y Mallarino, A. P. (2006). Crop Rotation Effects on Soil Quality at Three Northern Corn/Soybean Belt Locations. *Agronomy Journal*, 98(3), 484–495. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0098>
- Kravchenko, Y. S., Zhang, X., Liu, X., Song, C. y Cruse, R. M. (2011). Mollisols properties and changes in Ukraine and China. *Chinese Geographical Science*, 21(3), 257–266. <https://doi.org/10.1007/s11769-011-0467-z>
- Latif, M. A., Mehuys, G. R., Mackenzie, A. F., Alli, I. y Faris, M. A. (1992). Effects of legumes on soil physical quality in a maize crop. *Plant and Soil*, 140(1), 15–23. <https://doi.org/10.1007/BF00012802>

- Lewis, D. G. y Quirk, J. P. (1967). Phosphate diffusion in soil and uptake by plants. *Plant and Soil*, 26(1), 99–118. <https://doi.org/10.1007/BF01978678>
- Lindsay, W. L. (1979). *Chemical equilibria in soils*. New York, N.Y. (USA) Wiley.
- Lopez, L., Sierra, J., Fumagalli, C. y Ratto de Miguez, S. (1994). Variabilidad espacial de fosforo en suelo y planta en un argiudol tipico bajo cultivo de maiz. *Revista de la Facultad de Agronomía (Buenos Aires)*, 14(1), 1–8. <https://hal.inrae.fr/hal-02708143>
- Marina Ilusca (2010). Soil Fertility Basics NC Certified Crop Advisor Training Chapter 1 Basic Concepts. https://www.academia.edu/15316388/SOIL_FERTILITY_BASICS_NC_Certified_Crop_Advisor_Training_Chapter_1_Basic_Concepts
- McKenzie, R. H., Stewart, J. W. B., Dormaar, J. F. y Schaalje, G. B. (1992). Long-term crop rotation and fertilizer effects on phosphorus transformations: I. In a Chernozemic soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 72(4), 569–579. <https://doi.org/10.4141/cjss92-047>
- Mullins, G. (2009). *Phosphorus, agriculture & the environment*. <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/55777/424-029.pdf?sequence=1>
- Nafziger, E. D. y Dunker, R. E. (2011). Soil Organic Carbon Trends Over 100 Years in the Morrow Plots. *Agronomy Journal*, 103(1), 261–267. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0213s>
- National Cooperative Soil Survey U.S.A. (2015). *Flanagan Series*. University of Illinois.
- Ndayegamite, A. y Côte, D. (1989). Effect of Long-term Pig Slurry and Solid Cattle Manure Application on Soil Chemical and Biological Properties. *Canadian Journal of Soil Science*, 69(1), 39–47. <https://doi.org/10.4141/cjss89-005>
- Negassa, W., Baum, C., Schlichting, A., Müller, J. y Leinweber, P. (2019). Small-Scale Spatial Variability of Soil Chemical and Biochemical Properties in a Rewetted Degraded Peatland. *Frontiers in Environmental Science*, 7, Artículo 116. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00116>
- Newman, E. I. (1997). Phosphorus Balance of Contrasting Farming Systems, Past and Present. Can Food Production be Sustainable? *The Journal of Applied Ecology*, 34(6), 1334. <https://doi.org/10.2307/2405251>
- Obando, F., Villegas, A., Betancur, J. y Tafur, L. (2006). Variabilidad espacial de propiedades químicas y físicas en un Typic Udivitrans, arenoso de la región andina central colombiana. *Revista Facultad Nacional De Agronomía Medellín*, 59(1), 3217–3235.
- Odell, R., Walker, W., Batjes, N. H [N. H.] y Oldman, M. (1982). *The Morrow Plots - A Century of Learning*.
- Page, T., Haygarth, P. M., Beven, K. J., Joynes, A., Butler, T., Keeler, C., Freer, J., Owens, P. N. y Wood, G. A. (2005). Spatial variability of soil phosphorus in relation to the topographic index and critical source areas: Sampling for assessing risk to water quality. *Journal of Environmental Quality*, 34(6), 2263–2277. <https://doi.org/10.2134/jeq2004.0398>
- Penn, C. y Camberato, J. (2019). A Critical Review on Soil Chemical Processes that Control How Soil pH Affects Phosphorus Availability to Plants. *Agriculture*, 9(6), 120. <https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>

- Peña, V. (2006). *Caracterización de la variabilidad espacial de los atributos del suelo como base para el manejo por sitio específico en el cultivo de la piña gold: Estudio de caso Tauramena-Llanos Orientales* [Ph.D]. Facultad de Agrónimía, Bogotá.
- Pérez, A. (2015). *Cinética de la acidificación de suelos calcáreos* [Ph.D, México]. colposdigital.colpos.mx. <http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/2852>
- Prince, G. (2006). *Australian Soil Fertility Manual* (Vol. 3). CSIRO. www.publish.csiro.au
- Rasmussen, Goulding, Brown, Grace, Janzen y Korschens (1998). Long-term agroecosystem experiments: Assessing agricultural sustainability and global change. *Science (New York, N.Y.)*, 282(5390), 893–896. <https://doi.org/10.1126/science.282.5390.893>
- Rayne, N. y Aula, L. (2020). Livestock Manure and the Impacts on Soil Health: A Review. *Soil Systems*, 4(4), 64. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4040064>
- Redel, Y. D., Escudey, M., Alvear, M., Conrad, J. y Borie, F. (2011). Effects of tillage and crop rotation on chemical phosphorus forms and some related biological activities in a Chilean Ultisol. *Soil Use and Management*, 27(2), 221–228. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00334.x>
- Riedell, W. E., Schumacher, T. E., Clay, S. A., Ellsbury, M. M., Pravecek, M. y Evenson, P. D. (1998). Corn and Soil Fertility Responses to Crop Rotation with Low, Medium, or High Inputs. *Crop Science*, 38(2), 427–433. <https://doi.org/10.2135/cropsci1998.0011183X003800020026x>
- Rivera, E., Sanchez, M. y Domínguez, H. (2018). pH como factor de crecimiento en plantas. *Revista De Iniciación Científica*, 4(2).
- Robertson, G. P., Crum, J. R. y Ellis, B. G. (1993). The spatial variability of soil resources following long-term disturbance. *Oecologia*, 96(4), 451–456. <https://doi.org/10.1007/BF00320501>
- Roger, A., Libohova, Z., Rossier, N., Joost, S., Maltas, A., Frossard, E. y Sinaj, S. (2014). Spatial variability of soil phosphorus in the Fribourg canton, Switzerland. *Geoderma*, 217-218, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.11.001>
- Ruiz L. (1992). *Mobilisation du phosphore des apatites dans la rhizosphère. Rôle de l'excrétion de protons par les racines* [PhD]. Montpellier 2. <https://www.theses.fr/1992MON20246>
- Silva, A., Imhoff, S. y Giarola, N. y Tormena, C. (2001). Análisis multivariado y univariado en la discriminación de sistemas de uso de suelos del centro de Santa Fe. *Edafología*, 8, 21–34. <https://www.secs.com.es/data/revista%20edafo/partes%20volumen%208-1/paginas%2021-34.pdf>
- Soil Ohysics Companion: Soil Spatial Variability*. Variability in soil properties from soil classification. (2001).
- Strom, N., Hu, W., Haarith, D., Chen, S. y Bushley, K. (2020). Interactions between soil properties, fungal communities, the soybean cyst nematode, and crop yield under continuous corn and soybean monoculture. *Applied Soil Ecology*, 147, 103388. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103388>
- Tang, C. y Yu, Q. (1999). Impact of chemical composition of legume residues and initial soil pH on pH change of a soil after residue incorporation. *Plant and Soil*, 215(1), 29–38. <https://doi.org/10.1023/A:1004704018912>
- Thompson, L. (1982). *Soil and Fertility* (Fourth). McGraw.

- Trangmar, B. B., Yost, R. S. y Uehara, G. (1986). Application of Geostatistics to Spatial Studies of Soil Properties. En N. C. Brady (Ed.), *Advances in Agronomy* (2013^a ed., Vol. 38, pp. 45–94). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60673-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60673-2)
- Virginia Department of Conservation and Recreation. (2014). *Virginia Nutrient Management Standards and Criteria*, pp. 1–123.
- Wallander, S. (2020). Soil Tillage and Crop Rotation. *Economic Research Service*.
- Whalen, J. K., Chang, C [Chi], Clayton, G. W. y Carefoot, J. P. (2000). Cattle Manure Amendments Can Increase the pH of Acid Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 962–966. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.643962x>
- Wilding, Bouma y Don W. Goss. (2015). *Impact of Spatial Variability on Interpretive Modeling* (SSSA Specil Publications), 39, pp. 61–75.
- Zavaleta, J. (2010). *Kriging: Un método de interpolación sobre datos dispersos*.
- Zhang, S., Huffman, T., Zhang, X., Liu, W. y Liu, Z. (2014). Spatial distribution of soil nutrient at depth in black soil of Northeast China: a case study of soil available phosphorus and total phosphorus. *Journal of Soils and Sediments*, 14(11), 1775–1789. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0935-z>
- Zuber, S. M., Behnke, G. D., Nafziger, E. D. y Villamil, M. B. (2015). Crop Rotation and Tillage Effects on Soil Physical and Chemical Properties in Illinois. *Agronomy Journal*, 107(3), 971–978. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0465>

Anexos

Anexo A

Resumen de los principales cambios realizados en las Parcelas Morrow desde 1876 hasta 2009

Fase	Años	Cambios
1	1876 – 1904	Eliminación de las parcelas 1,2, 6,7,8,9 y 10. Cambios en la rotación de cultivos. Reducción del área de estudio. Aumento en la cantidad de estiércol (45 mg/ha). Uso de cal para ajuste de pH.
2	1905 – 1954	Aplicación de MLP a las parcelas S. Eliminación de residuos orgánicos en todas las parcelas. Establecimiento de alfalfa a la parcela 5.
3	1955 – 1967	Eliminación de residuos orgánicos de las parcelas no tratadas y con MLP. Aplicación de cal (5 ton/ha) a parcelas no tratadas.
4	1968 – 1997	Aplicación de LNPK rica en N a las subparcelas SA. Reincorporación de residuos al suelo, menos el heno.
5	1999 – 2009	Cambio del arado de vertedera al arado a cincel de vástago retorcido. Aplicación de LhiNPK en las parcelas SA.

Nota. Tomado de Nafziger y Dunker (2011) y Odell et al. (1982).

Anexo B

Regresión múltiple y Correlación de Spearman

parámetro	Cantidad	Valor - F	Valor - P
Tratamiento	9	22.48	<0.0001
Profundidad	2	33.52	<0.0001
Años	8	1.63	0.1183

Variable 1	Variable 2	Cantidad	Spearman	Valor-P
P	P	270	1.00	<0.0001
P	pH	270	0.27	<0.0001
pH	P	270	0.27	<0.0001
pH	pH	270	1.00	<0.0001

Anexo C

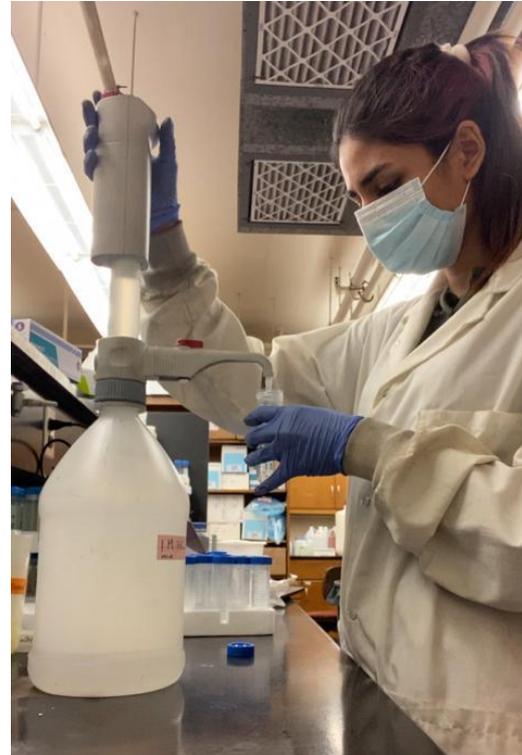
Parcelas Morrow

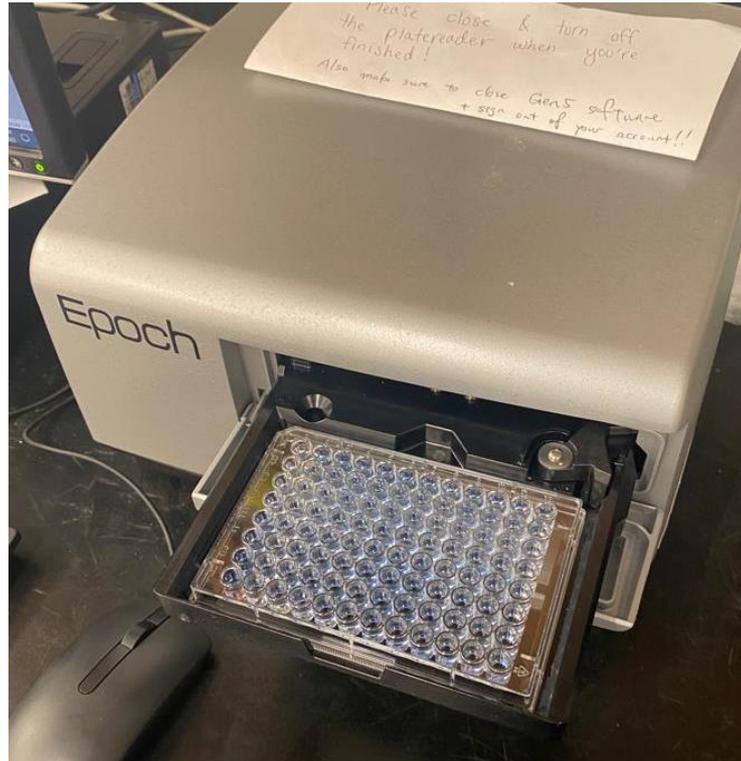


Anexo D

Toma de muestra con uso de barreno



Anexo E*Toma del Fósforo Total*



Anexo F

Toma de pH

