

ISSN: 2518-489X



Revista Utesiana de la Facultad de ARQUITECTURA E INGENIERÍA

Trabajos de Investigación
Volumen V, Número V

Número Especial

Resultados del Proyecto de Investigación "Aprovechamiento
de los biosólidos generados en la Planta de Tratamiento de
Aguas Residuales (PTAR) Rafey en agricultura"

www.utesa.edu

REVISTA UTESIANA DE LA FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA

COMITÉ EDITORIAL

Director: Francisco Orgaz Agüera

Vicerrector de Producción e Investigación Científica

Universidad Tecnológica de Santiago (República Dominicana)

E-mail: franorgaz@utesa.edu

CONSEJO CIENTÍFICO ASESOR Y REVISOR

Raúl Toribio Silverio, Universidad Tecnológica de Santiago

Mario Castellanos Verdugo, Universidad de Sevilla (España)

José Luís Álvarez, Universidad Tecnológica de Santiago

Sebastián Germoso García, Universidad Tecnológica de Santiago

Tomás López-Guzmán, Universidad de Córdoba (España)

Salvador Moral Cuadra, Universidad Tecnológica de Santiago

Juan Antonio Jimber del Río, Universidad de Córdoba

Pablo Cañero Morales, Universidad de Córdoba

José Castillo Jáquez, Universidad Tecnológica de Santiago

Atuey Martínez Durán, Universidad Tecnológica de Santiago

Roberto Gómez, Ministerio de Medio Ambiente (Rep. Dom.)

Carlos Felipe Cabrera, Universidad Tecnológica de Santiago

Vladimir Rodríguez Núñez, Universidad Tecnológica de Santiago

José Díaz Rodríguez, Universidad Tecnológica de Santiago

José. F. Domínguez, Universidad del Caribe (México)

Edwin Marte, Universidad Tecnológica de Santiago

Reymi Then, Universidad Tecnológica de Santiago

Manuel A. Ribeiro, Universidad de Surrey (Reino Unido)

Rafael F. Vargas Martínez, Universidad Tecnológica de Santiago

Huáscar Frías Vilorio, Universidad Tecnológica de Santiago

REVISTA UTESIANA DE LA FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA

ISSN: 2518-489X

Revista de distribución web (Edición Digital)

Edita:

Vicerrectoría de Producción e Investigación Científica
Universidad Tecnológica de Santiago (República Dominicana)
809 582 7156, Ext. 365
investigaciones@utesa.edu
www.utesa.edu

Periodicidad:

Anual (abril)

Bases de datos:

La Revista Utesiana de la Facultad Ciencias de la Salud se encuentra indexada en el Directorio de Latindex y en Google Académico. Actualmente está en evaluación en otras bases de datos.

GUÍA PARA AUTORES

El contenido de la Revista Utesiana de la Facultad de Arquitectura e Ingeniería versará sobre temas de investigación originales vinculados a las siguientes carreras de Ingeniería: Civil, Eléctrica, Electrónica, Sistemas Computacionales, Mecánica e Industrial. También, sobre Arquitectura. La estructura del artículo debe constar, como mínimo, de las siguientes partes: título; nombre, afiliación y correo electrónico de los autores; resumen y palabras clave en español e inglés; introducción; materiales y métodos; resultados y discusión; conclusiones; y bibliografía.

Las comunicaciones enviadas deberán cumplir con las siguientes normas y estructura:

- Extensión del artículo: 5.000 – 7.000 palabras.
- Resumen: no superar las 500 palabras.
- Palabras clave: 5 – 8 palabras.
- No hay máximo de autores.
- Márgenes: 2.5 cm en todos los lados.
- Interlineado: Simple.
- Fuente: Arial, 10 puntos (el título en tamaño 12).
- Títulos de la estructura del texto: Mayúscula y negrita.
- Las tablas, gráficos y figuras deberán ir insertadas en el texto, junto a un título en la parte superior y una fuente en la parte inferior.
- Citas: Modelo APA 2017 (sexta edición) o posteriores.

El incumplimiento de estas normas puede provocar el rechazo del artículo.

Se requiere el compromiso de los autores tanto en la originalidad del artículo como de no enviar el texto, simultáneamente, a otras revistas para su publicación. Los autores serán los únicos responsables de las afirmaciones y declaraciones incluidas en su texto.

Los artículos serán enviados por correo electrónico: **investigaciones@utesa.edu** en formato Word. Los artículos recibidos se someterán a un proceso de revisión por pares anónimos. Los resultados de la evaluación serán remitidos al autor mediante correo electrónico.

Número Especial

Aprovechamiento de los biosólidos generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Rafey en agricultura

Citar este artículo como: Martínez Durán, A., Castillo Jáquez, J., Orgaz Agüera, F., Acosta Guzmán, J., & Rodríguez Núñez, V. (2020). Aprovechamiento de biosólidos generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Rafey en agricultura. *Revista Utesiana de la Facultad de Arquitectura e Ingeniería*, 5(número especial 5), 10-79.

Título del proyecto: Aprovechamiento de biosólidos generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Rafey en agricultura.

Entidad ejecutora: Universidad Tecnológica de Santiago, UTESA.

Entidad consorciada bajo acuerdo de convenio: Corporación del Acueducto y Alcantarillado de Santiago, CORAASAN.

Entidad financiadora del proyecto: Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología, MESCyT, a través del Fondo Nacional de Innovación y Desarrollo Científico y Tecnológico, FONDOCyT.

Entidades co-financiadoras: UTESA y CORAASAN.

Presupuesto ejecutado: RD\$ 8,228,173.34

Año de aprobación del proyecto: Convocatoria 2015.

Año de inicio y finalización del proyecto: 2016-2019

Investigador principal del proyecto: Ing. Atuey Martínez Durán, MIA.

Co-investigadores del proyecto: Dr. José Castillo Jáquez, Dr. Francisco Orgaz Agüera, Dr. José Acosta Guzmán e Ing. Vladimir Rodríguez Núñez.

Más información sobre el proyecto: investigaciones@utesa.edu

1. ASPECTOS INTRODUCTORIOS

El presente apartado se ha dividido en cuatro partes: introducción, problemática de la investigación, justificación e importancia y, por último, objetivos de la investigación.

1.1. Introducción

El objetivo general de esta investigación es desarrollar un modelo para el uso eficiente y sostenible de los biosólidos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en el cultivo de maíz en la República Dominicana.

La problemática de la investigación surge por la ausencia de estudios técnicos y científicos sobre el tratamiento, manejo, aprovechamiento y disposición final de los biosólidos en la República Dominicana. En este sentido, la Corporación del Acueducto y Alcantarillado de Santiago (CORAASAN) se ve precisada a invertir, anualmente, cuantiosos recursos económicos para el retiro físico y disposición final de los lodos residuales producidos en el proceso de tratamiento de las aguas residuales, al considerarlos residuos contaminantes. Con el incremento de la población en la ciudad de Santiago de los Caballeros esta problemática es más significativa, debido al aumento del caudal de las aguas residuales y, por consiguiente, al incremento del volumen de los lodos residuales. Los aspectos que justifican esta investigación se fundamentan en los aportes que se generan, de carácter ambiental, socioeconómico, agrícola, tecnológico y de salud, al usar de manera racional los potenciales biosólidos que se generan en la PTAR Rafey.

El aprovechamiento agrícola de los biosólidos es una práctica establecida y aceptada en muchos países del mundo, destacando en Estados Unidos, México y otros países de la Comunidad Europea. La aplicación de los biosólidos en suelos agrícolas se basa en satisfacer los requerimientos de nitrógeno y otros nutrientes necesarios para los cultivos, y en evitar la sobredosis de metales pesados (Barbarick y Ippolito, 2000), que son potencialmente dañinos, debido a que contienen contaminantes químicos y agentes patógenos causantes de diversas enfermedades. En consecuencia, se puede asegurar que al aplicar los biosólidos al suelo se mejora su estructura, su productividad y aumenta la actividad microbiana del sustrato, debido a que se incrementa el contenido de macro y micro-nutrientes, potencializándose la retención de humedad en los suelos. En el caso específico del maíz, existen estudios donde se han utilizado los biosólidos como fertilizante para mejorar el desarrollo del cultivo (Flores-Pardavé *et al.*, 2011; González *et al.*, 2014).

Esta investigación se enmarca dentro de las líneas establecidas en el Plan Estratégico Sectorial de Desarrollo Agropecuario 2010-2020 del Ministerio de Agricultura de la República Dominicana, en donde se establece la línea estratégica denominada "Fortalecimiento y Establecimiento de Cadenas

Agroalimentarias", que tiene como línea de acción el "impulsar la reconversión productiva de los productos considerados sensibles", entre ellos el maíz. Este estudio, también, se articula en el Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación 2008-2018 del Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (MESCyT) de la República Dominicana, puesto que contribuye al mejoramiento competitivo de los sectores productivos nacionales (agricultura y ganadería). Este Plan Estratégico incluye un Programa de Producción Sostenible y Seguridad Alimentaria, el cual busca producir agroalimentos de manera eficiente en términos sociales, económicos y ambientales, mejorando los canales de distribución de alimentos. El citado Programa busca proveer a la sociedad dominicana de un marco de seguridad alimentaria que contribuya a la reducción de la pobreza de la población y, al mismo tiempo, a mejorar los indicadores de salud y nutrición del país. En este sentido, esta investigación, también contribuye al mejoramiento de la producción sostenible y seguridad alimentaria.

1.2. Problemática de investigación

Las aguas residuales generadas en la ciudad de Santiago de los Caballeros son colectadas y tratadas en apenas un 44%. Del total generado, el 35% (600 litros por segundo) se trata en la PTAR Rafey, localizada al suroeste de la ciudad. La capacidad de tratamiento de dicha planta es de 1,217 litros por segundo, que corresponde al 70% del caudal que se genera en la ciudad de Santiago de los Caballeros.

El proceso de tratamiento que se realiza en la planta es de lodos activados con aireación extendida, obteniéndose como subproducto los lodos residuales que, a su vez, son deshidratados en filtros de banda. Dichos lodos, requieren ser retirados, transportados y depositados en lugares ambientalmente adecuados. En la PTAR Rafey se producen diariamente unos 25 m³ de lodos residuales, los cuales son vertidos de forma inadecuada en terrenos localizados en el sector Cienfuegos, Distrito Municipal Santiago Oeste, municipio Santiago de los Caballeros, a una distancia de ocho (8) kilómetros de la Planta de tratamiento. En este sentido, es importante señalar el impacto ambiental negativo que, de manera directa, los lodos residuales vertidos originan en los suelos y su entorno.

La problemática existente con este tipo de residuos es que, al no disponerse en República Dominicana de estudios técnicos que determinen la viabilidad de su aprovechamiento, la CORAASAN invierte, cada año, cuantiosos recursos económicos para su manejo y disposición final. En República Dominicana no existen reglamentos o normativas para el tratamiento, manejo, aprovechamiento y/o disposición final de los lodos residuales producidos en los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Así, el incremento poblacional que se ha experimentado en los últimos años en la ciudad de Santiago de los Caballeros ha producido un mayor caudal de aguas residuales y, en consecuencia, un aumento significativo del volumen de lodos residuales. Esto

hace que encontrar una solución viable al problema, especialmente en términos económicos, agrícolas y ambientales, sea considerado de vital importancia para el país y de manera particular para el sector agua potable y de saneamiento.

Por tanto, esta investigación se enfoca en la utilización racional de los lodos residuales producidos en la PTAR Rafey, mediante su aprovechamiento como biosólidos. En la actualidad, no se dispone en República Dominicana de la suficiente información técnica y experiencia comprobada para el adecuado manejo y aprovechamiento de los biosólidos, como se ha logrado en otros países.

1.3. Justificación e importancia

Los aspectos que justifican esta investigación se fundamentan en los cuantiosos aportes de carácter ambiental, socioeconómico, agrícola, tecnológico y de salud, y que se manifiestan al utilizar de manera racional los biosólidos que se generan en las plantas de tratamiento de aguas residuales. El aprovechamiento agrícola de los biosólidos es una práctica establecida y aceptada en muchos países del mundo. En el estado de California (Estados Unidos, EEUU) se utiliza en suelos agrícolas el 52% de los biosólidos producidos, mientras que en Arizona (EEUU) se utiliza el 86% de los que se producen (Fondahl, 1999). En la Comunidad Económica Europea (CEE), más de una tercera parte de los biosólidos producidos son utilizados en la agricultura (Akrivos *et al.*, 2000).

La aplicación de biosólidos en suelos agrícolas se basa en satisfacer los requerimientos de nitrógeno (N) y otros nutrientes necesarios para los cultivos, y en evitar la sobredosis de metales pesados (Barbarick e Ippolito, 2000). En el suelo, los patógenos mueren gradualmente y no presentan ningún efecto degenerativo final, pero los contaminantes químicos, especialmente los elementos trazas procedentes de metales pesados, pueden persistir en el suelo y ser absorbidos por las plantas cultivadas, y en cantidades excesivas afectan a la salud de los consumidores y de las mismas plantas.

Los suelos agrícolas y forestales son susceptibles de experimentar desbalances para mantener estable los niveles de composición orgánica, debido al excesivo laboreo, a la producción intensiva, al uso de fitosanitarios, al pastoreo, entre otros. Estos factores ocasionan una disminución de la fertilidad natural de los suelos, acentuándose en regiones con poca producción de biomasa. Frecuentemente, se presentan problemas ambientales, como erosión, baja infiltración, menor capacidad de almacenamiento de agua, dificultad para el desarrollo integral del suelo y deficiencia en el establecimiento de poblaciones microbianas benéficas (Dalal y Mayer, 1986).

De igual manera, se puede asegurar que una aplicación adecuada de biosólidos mejora la estructura y productividad de los suelos, y aumenta la

actividad microbiana del sustrato, debido al incremento en el contenido de macro y micro-nutrientes. Lo indicado anteriormente potencia la retención de humedad en el suelo. El uso de los biosólidos también reduce, de manera significativa, los costos de producción de los cultivos, debido a que permite disminuir el uso de agroquímicos. Es pertinente señalar que, en conformidad con investigaciones realizadas, los biosólidos se integran con mucha afinidad a los diferentes tipos de suelo, sobre todo, en superficies erosionadas o degradadas (Torres y Zarate, 1997).

Existen estudios (Banuelos *et al.*, 2007; Odlare *et al.*, 2008) acerca del uso de biosólidos en la agricultura, que analizan la relación de la fertilidad del suelo, el desarrollo de los cultivos y su rendimiento. En el caso específico del maíz, varios investigadores (Zamora *et al.*, 1999; Uribe *et al.*, 2002; Bautista, 2005; Flores-Pardavé *et al.*, 2011; González *et al.*, 2014) han utilizado los biosólidos como fertilizante para mejorar el desarrollo del cultivo.

De acuerdo a los datos estadísticos suministrados por el Ministerio de Agricultura (2015) de República Dominicana, la producción promedio anual de maíz en el periodo 2002-2013 fue del 5.7% de la demanda nacional. Para el mismo periodo, el volumen de importación fue del 94.3%, equivalente a US\$184,223,492.09 (RD\$8,290,057,144.11). De estas informaciones se infiere que el mercado nacional presenta una demanda muy por encima de la cantidad de maíz producida y, ante la situación descrita, es oportuno proponer nuevas tecnologías para incentivar y fomentar el cultivo de este importante rubro, con el objetivo de satisfacer, en un mayor nivel, la demanda nacional.

De acuerdo al Plan Estratégico Sectorial de Desarrollo Agropecuario 2010-2020 del Ministerio de Agricultura de la República Dominicana, se establece una línea estratégica denominada "Fortalecimiento y Establecimiento de Cadenas Agroalimentarias", donde como línea de acción se pretende impulsar la reconversión productiva de los productos considerados sensibles, tales como el arroz, la leche, las habichuelas, el pollo, el azúcar, el maíz, la cebolla y el ajo. De esta manera, el referido Plan Estratégico fomenta la producción agrícola y ganadera, a través de insumos y material de siembra entregados a los diversos agricultores. Entre el material de siembra se establece la donación de 6,252 quintales de semilla de gandules, habichuelas y maíz.

1.4. Objetivos de la investigación

El objetivo general de esta investigación es desarrollar un modelo para el uso eficiente y sostenible de biosólidos en el cultivo de maíz en la República Dominicana. A partir de este objetivo, se derivan los siguientes objetivos específicos:

- a) Identificar las características de los biosólidos producidos en la PTAR Rafey.

- b) Determinar el potencial aprovechable de los biosólidos a partir de sus características físicas, químicas y microbiológicas.
- c) Establecer la clasificación para el aprovechamiento agrícola de los biosólidos en el cultivo de maíz.
- d) Fomentar la aplicación de técnicas para la utilización de biosólidos en cultivos alternativos.

2. MARCO TEÓRICO

El presente apartado se ha dividido en dos partes: antecedentes y estado del arte.

2.1. Antecedentes

La significativa cantidad de desechos que se generan en las ciudades, y su efecto directo en el ambiente, son una manifestación de la compleja relación que existe entre la sociedad y la naturaleza (Galafassi, 1998). Los grandes centros urbanos e industriales situados en la geografía mundial requieren grandes cantidades de materias primas, insumos y energía para garantizar sus condiciones materiales de existencia (Toledo y De Molina, 2007). En este sentido, cabe destacar la cuantiosa demanda de agua requerida por los seres humanos y el mantenimiento de las instalaciones urbanas (González *et al.*, 2014).

En las últimas décadas ha aumentado la necesidad de tratar adecuadamente las aguas residuales en las grandes ciudades, con la finalidad de reutilizarlas en algunas actividades y de verterlas a los cuerpos receptores con una mejor calidad. De esta forma, se mantiene la capacidad de asimilación y autodepuración de dichos cuerpos dentro de su rango de tolerancia. Sin embargo, tratar las aguas residuales generadas en las grandes ciudades representa un problema ambiental de alta relevancia, el cual toma forma a través de la generación de enormes cantidades de lodos residuales o biosólidos (González *et al.*, 2014).

Los lodos son un subproducto generado en los procesos de tratamiento de las aguas residuales, y su manejo y disposición final se ha convertido en un problema para la salud y el medio ambiente (González *et al.*, 2014), lo que ha impulsado la realización de numerosas investigaciones sobre esta problemática (Zhou y Smith, 2002; Ye y Zhang, 2011; Rocamora *et al.*, 2015; Martínez *et al.*, 2016; Navarro y Zamudio, 2016; Londoño *et al.*, 2017; De Anda, 2017; López *et al.*, 2017; Al-Gheethi *et al.*, 2018).

Como respuesta a la situación planteada, se han realizado diversos estudios sobre el uso de los biosólidos en la agricultura (Cicek, 2003; Guzmán y Campos, 2004; Utria-Borges *et al.*, 2008; Eissa *et al.*, 2014; Quist-Jensen *et al.*, 2015; Faour-

Klingbeil y Todd, 2018; Bougnom *et al.*, 2019), debido a su elevado contenido de materia orgánica y de otros elementos esenciales para el desarrollo óptimo de los cultivos (González *et al.*, 2014). En otras investigaciones se afirma que los biosólidos mejoran las características físicas, químicas y biológicas del suelo (Andrade *et al.*, 2000) y pueden aumentar el rendimiento de los cultivos (Hernández-Herrera *et al.*, 2005), aunque, según He *et al.* (2005) existen riesgos por el probable exceso de metales pesados.

Los estudios que se han realizado sobre el uso de los biosólidos en suelos agrícolas se enfocan en el impacto ambiental que puede provocar en el suelo, debido al contenido de elementos potencialmente tóxicos que se encuentran en los biosólidos (González *et al.*, 2014), lo que pone en peligro la salud humana y animal (He *et al.*, 2005; González *et al.*, 2014). Entre estos elementos se encuentran el zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg) y cromo (Cr), teniendo todos ellos un gran potencial de acumulación en los tejidos humanos (Bautista, 2005).

En algunas investigaciones (Banuelos *et al.*, 2007; Odlare *et al.*, 2008) se han realizado estudios referentes a los efectos del uso de los biosólidos en suelos agrícolas, donde se mide el impacto de las características que determinan la fertilidad del suelo, el desarrollo de los cultivos y los rendimientos en diferentes tipos de plantas y suelos. También, se han realizado estudios sobre el cultivo del maíz (Villalobos *et al.*, 2017).

2.2. Estado del arte

En el caso específico del uso de los biosólidos en el cultivo de maíz, diversas investigaciones (Zamora *et al.* 1999; Uribe *et al.*, 2002; Bautista, 2005; Flores-Pardavé *et al.*, 2011; Robledo, 2012; González *et al.*, 2014; Villalobos *et al.*, 2017) han estudiado los biosólidos como fertilizante para mejorar el desarrollo del cultivo. Así, Zamora *et al.* (1999) indicaron que la aplicación de los biosólidos en el cultivo de maíz incrementa hasta un 35% el rendimiento de la planta con respecto a la fertilización química convencional, atribuyendo dichos resultados a los nutrientes básicos de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) que contenían los biosólidos.

Uribe *et al.* (2002) observaron, a partir de la aplicación de los biosólidos, incrementos del 11-18% en el rendimiento de forraje verde, en comparación al testigo fertilizado; también observaron incrementos entre el 27-35% en comparación al testigo absoluto. Estos autores concluyeron que la dosis de biosólidos más adecuada para el cultivo de maíz forrajero, desde el punto de vista agronómico y económico, resultó ser de 10 toneladas por hectárea. Bautista (2005) también evaluó el efecto de la aplicación de los biosólidos en el cultivo de maíz, y en su estudio indicó que los biosólidos incrementaban el rendimiento de la planta hasta en un 25%. Por su parte, Flores-Pardavé *et al.* (2011) encontraron que los biosólidos mejoraban el cultivo de maíz, si bien,

indicaron que su mejoramiento era inferior comparándolo con otros cultivos, como la alfalfa.

Según González *et al.* (2014), la aplicación de los biosólidos aumenta los rendimientos de los suelos agrícolas en México, si bien, afirman que existe un manejo inadecuado, ineficiente y prácticamente improvisado de los biosólidos por parte de los productores. Por su parte, Villalobos *et al.* (2017) evaluaron los niveles de nitrógeno (N) y fósforo (P) en las plantas de maíz forrajero a partir de dos tratamientos: fertilización química y por riego con aguas residuales. Los resultados mostraron que el riego con agua residuales mejoraba los resultados de la fertilización química, opteniéndose valores más elevados de nitrógeno y fósforo en la planta y en las hojas.

En República Dominicana no se han realizado estudios con rigor científico sobre la utilización de biosólidos en la agricultura. También, es necesario señalar que no existen normativas regulatorias sobre el manejo y aprovechamiento de los biosólidos. A nivel internacional sí existen normativas que regulan el uso y manejo de los lodos residuales (biosólidos), como las siguientes:

- a) *Part 503—Standards For The Use Or Disposal Of Sewage Sludge*, de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.
- b) Norma Oficial Mexicana NOM-004- SEMARNAT-2002 de Protección Ambiental, Lodos y Biosólidos de México.
- c) Decreto Número 1287 que establece los criterios para el uso de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en Colombia.
- d) Directiva del Consejo Europeo (86/278/CEE) relativa a la protección del medio ambiente y de los suelos.

Las contribuciones específicas que se derivan de esta investigación tienen incidencia en el aporte de nuevos conocimientos acerca de la composición físico-química y microbiológica del lodo residual producido en la PTAR Rafey y su aprovechamiento, como biosólido, en el cultivo de maíz.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se presenta la ubicación de la zona experimental; la descripción de los bloques; los cultivos a analizar; los materiales e instrumentos a utilizar en el trabajo de campo; las variables y métodos de análisis en laboratorio; el análisis de las muestras del cultivo; las herramientas de análisis de datos; y, por último, la descripción del proceso de experimentación.

3.1. Ubicación de la zona experimental

La zona experimental seleccionada para la aplicación de los biosólidos bajo estudio corresponde a la Finca Experimental de UTESA, la cual está ubicada en el sector Estancia del Yaque, en el municipio de Villa Bisonó. Esta zona tiene una precipitación anual de unos 660 mms, con una zona de vida de bosque seco y con temperaturas promedios de 28-30 °C. El suelo de la Finca Experimental tiene una textura franco-arcillosa, con un pH ligeramente alcalino y abastecido con agua del canal Ulises Francisco Espaillat, proveniente del río Yaque del Norte. El suelo a cultivar no está afectado por el nivel freático.

3.2. Descripción de los bloques experimentales

El área de estudio se dividió en cinco bloques parcelarios cuadrados de 324 m² cada uno, como se describe a continuación:

- Bloque I. Testigo: en esta área, al suelo no se le aplicó biosólidos ni fertilizantes químicos. Se utilizaron, solamente, los tratamientos de control fitosanitario recomendados por el Ministerio de Agricultura de la República Dominicana.
- Bloque II: en este bloque, se cultivó el maíz acorde a los procedimientos tradicionales, según las técnicas recomendadas por el Ministerio de Agricultura de la República Dominicana.
- Bloque III: en esta área, se aplicó al suelo la tasa agronómica de biosólidos, con ayuda de utensilios mecánicos, en un periodo no mayor a 30 días a partir de haberse realizado la siembra del cultivo. Así mismo, se utilizaron los tratamientos de control fitosanitario recomendados por el Ministerio.
- Bloque IV: en este bloque, se aplicó al suelo la tasa agronómica de biosólidos a través del método en bandas, el cual consiste en aplicar los biosólidos de manera superficial y sin mezcla, a un lado de cada planta y en una sola hilera. La aplicación de los biosólidos se realizó en un periodo no mayor a los 30 días, luego de haberse realizado la siembra del cultivo.
- Bloque V: en esta área, se aplicó al suelo la tasa agronómica de biosólidos a través del método en bandas, incorporándolo mezclado previamente con el terreno a cultivar.

En cada uno de los bloques se realizaron dos cultivos de maíz: la siembra del primero se hizo a finales del año 2017 y la del segundo a mediados de 2018. En la tabla 1 se describe el proceso de fertilización realizado en cada uno de los cinco bloques experimentales cultivados para cada una de las cosechas. En este sentido, la tabla 1 indica el número de bloque, la fecha de aplicación, el tipo de fertilizante, la dosis utilizada en cada cosecha y, por último, la técnica de aplicación.

Tabla 1. Aplicación de la fertilización a los bloques experimentales.

Bloque	Fecha aplicación	Tipo de Fertilizante	Dosis utilizada (t/ha)		Técnica de aplicación
			PC	SC	
I	-	Ninguno	-	-	Al bloque testigo no le fue aplicado ningún tipo de fertilizante
II	PC: 11/12/2017 SC: 27/09/2018	16-20-0-5S	29 lb/ha	29 lb/ha	El fertilizante químico se aplicó en banda simple, en cada hilera del cultivo, incorporándolo inmediatamente al suelo mediante aporque
III	PC: 11/12/2017 SC: 27/09/2018	Biosólido	15	30	El biosólido se aplicó en cada hilera del cultivo utilizando la técnica en bandas e inmediatamente se realizó el aporcado para su incorporación al suelo
IV	PC: 11/12/2017 SC: 27/09/2018	Biosólido	15	30	El biosólido se aplicó en cada hilera del cultivo utilizando la técnica en bandas sin ser incorporado o mezclado con el suelo
V	PC: 22/11/2017 SC: 30/08/2018	Biosólido	15	30	En la fase inicial se distribuyó el biosólido de manera uniforme en todo el bloque (utilizando cubos y rastrillo) y luego se utilizó un tractor con rastra para la incorporación del mismo al suelo. Finalmente, se realizó el surcado correspondiente utilizando tracción animal (un caballo)

Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

La tabla 1 muestra que en el bloque I no se utilizó ningún fertilizante; también, se puede observar que para el bloque II se utilizó la misma cantidad de fertilizante en ambas cosechas (29 lb/ha). En el caso de la fertilización de los bloques III, IV y V mediante la aplicación de los biosólidos, se utilizó una dosis de 15 lb/ha en el primer cultivo realizado (primera cosecha); para la segunda cosecha, la dosis se duplicó a 30 lb/ha. Estas dosis se establecieron luego de evaluar los resultados correspondientes a las características del suelo y del biosólido utilizado, las cuales fueron obtenidas mediante análisis de laboratorio.

3.3. Cultivo a analizar

Se seleccionaron semillas de maíz de acuerdo a los criterios genéticos y experiencia agrícola de los técnicos del Ministerio de Agricultura de la República Dominicana. Estos técnicos recomendaron sembrar maíz híbrido del modelo 30F35, de origen brasileño y marca *Pioneer*. Esta semilla fue donada para la investigación por el propio Ministerio de Agricultura.

Este tipo de maíz fue introducido al país por la empresa DUWEST Dominicana hace, aproximadamente, ocho años. Según informaciones suministradas por el personal técnico del Ministerio de Agricultura, este Ministerio promueve su cultivo esencialmente en las provincias de San Juan y Azua, con el objetivo de que los productores roten los cultivos de habichuela en San Juan, y de tomate industrial en Azua. En la Línea Noroeste, el Ministerio lo promueve entre los ganaderos para la producción de forraje, que se utiliza en la alimentación del ganado.

3.4. Materiales e instrumentos a utilizar en el trabajo de campo

Para el desarrollo del trabajo experimental, se utilizaron maquinarias y equipos agrícolas (tractor con rastra, surqueadores, bomba de fumigación y equipos de laboreo agrícola), carteles de identificación parcelaria de los bloques, una cámara fotográfica, sogas, estacas y equipos de protección personal.

Además, se utilizaron materiales e instrumentos de oficina, tales como computadora, impresora, calculadora científica, cuadernos de notas, hojas de papel, lapiceros, entre otros.

3.5. Variables y métodos de análisis en laboratorio

A los suelos correspondientes a cada bloque cultivado se les realizaron análisis de laboratorio en dos ocasiones:

- a) El primero para analizar las características del suelo de cada bloque, previo a la primera siembra de maíz.

- b) El segundo para analizar el comportamiento experimentado por el suelo de cada bloque luego de realizar la primera cosecha y previo a la segunda siembra de maíz.

De igual manera, a los biosólidos utilizados para la fertilización de los cultivos de los bloques III, IV y V, se les realizaron análisis de laboratorio en dos ocasiones:

- a) El primero para determinar las características de los biosólidos utilizados en la fertilización del primer cultivo de maíz (primera cosecha).
- b) El segundo para determinar las características de los biosólidos utilizados para fertilizar el segundo cultivo de maíz (segunda cosecha).

En relación a los análisis de los suelos cultivados, se analizaron los siguientes elementos: Materia orgánica (MO), fósforo (P), potasio (K), Magnesio (Mg), Calcio (Ca), sodio (Na), potenciador de hidrógeno (pH), capacidad de intercambio catiónico (CIC), azufre (S), zinc (Zn), manganeso (Mn), hierro (Fe), cobre (Cu), boro (B), conductividad eléctrica (CE), saturación (K, Mg y Ca) y sus relaciones. Para realizar estos análisis se contrataron los servicios de la empresa dominicana Fertilizantes Santo Domingo (FERSAN). A fin de que la muestra fuese representativa, para cada análisis se obtuvieron 55 submuestras tomadas de forma homogénea por toda la superficie que correspondía al terreno donde se ubicaban los cinco bloques experimentales. Con este número de submuestras se reduce el error muestral (López y Miñano, 1988). La profundidad del muestreo fue realizada entre los 0 -10 cm, siguiendo las recomendaciones científicas (López y Miñano, 1988).

En relación con los análisis realizados a los lodos residuales producidos en la PTAR Rafey, fueron analizados los parámetros indicados en la tabla 2. Estos residuos, son generados y estabilizados en la misma PTAR Rafey por medio de aireación extendida, con lo cual se eliminan una gran cantidad de microorganismos patógenos; posteriormente, estos lodos son deshidratados utilizando filtros prensa. Para realizar los análisis a los biosólidos, se contrataron los servicios de la empresa puertorriqueña EQLAB (Environmental Quality Laboratories, Inc.). Los biosólidos utilizados para fertilizar el suelo fueron seleccionados de los lodos deshidratados producidos en momentos diferentes del proceso de tratamiento de la PTAR Rafey, de manera independiente para cada cosecha. Dichos lodos, previo a la siembra de cada uno de los dos cultivos realizados, fueron transportados y depositados en un área de la Finca Experimental, adyacente al terreno correspondiente a los cinco bloques experimentales donde se realizaron las siembras. Las muestras de los lodos deshidratados que se utilizaron en los análisis fueron tomadas un tiempo después de haberse depositado los mismo en la Finca Experimental.

Tabla 2. Parámetros y métodos utilizados en el análisis de los biosólidos.

Parámetro	Método
Alcalinidad	SM 2320 B
Coliformes fecales	SM9221 B/E
Humedad	ASTM D-2974
ICP Metales pesados: Cadmio, calcio, cromo, cobre, plomo, níquel, hierro, magnesio, potasio, sodio y zinc	EPA 6010B
Sólidos suspendidos	SM2540 D
pH	SM 4500 H B
Salmonela MPN	SM9260 D
Temperatura	EPA 170.1
Nitrógeno total	SM 4500 N
Carbono orgánico total	EPA 415.1
Fósforo total	SM 4500- P A,B,E
Sólidos volátiles totales	SM2540 G
Huevos de helmintos	SM 10200
Corrosividad	EPA 9045C
Cianuro	SW 846 – 7.3.3
Sulfuro	SW 846 – 7.3.4
TCLP – ICP 6010 B: arsénio, bario, cadmio, cromo, plomo, selenio y plata	EPA 6010 B
TCLP VOC EPA 8260B	EPA 8260B
Herbicidas	EPA 8151 A
Mercurio	EPA 7470 A
Pesticidas	EPA 8081 A
TCLP semivolátiles	EPA 8270C

Fuente: elaboración propia.

Las tomas de muestras de los biosólidos, para el análisis en laboratorio, fue realizada en la Finca Experimental. La primera muestra, utilizada para la primera cosecha, fue realizada 30 días después de que los biosólidos fueron producidos en la PTAR Rafey y depositados en la Finca. Al momento de la toma de esta muestra, el biosólido conservaba una alta condición de humedad (cercana al 80%), en virtud de la condición climática de ese momento (lluvia frecuente). La segunda toma de muestra del biosólido, utilizado para la fertilización de la segunda cosecha, fue realizada 60 días después de este haber sido producido en la PTAR RAfey. En esta oportunidad, el clima permaneció seco (sin lluvia) hasta el momento de la toma de muestra.

Se analizaron las características físicas, químicas y microbiológicas especificadas en la Norma de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) y en la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, a fin de verificar la clasificación de uso de los biosólidos generados en la PTAR Rafey. De igual manera, en los análisis de laboratorio se determinaron los

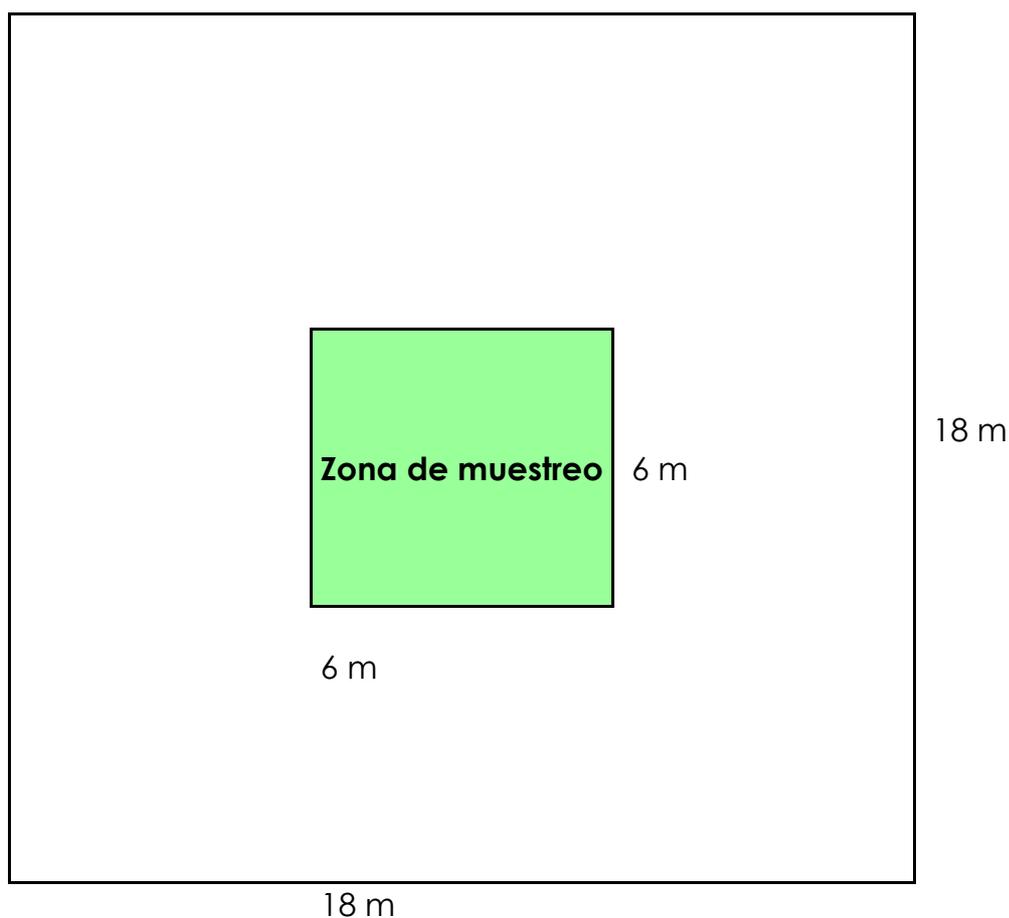
valores correspondientes a los macro y micronutrientes contenidos en el biosólido, a fin de establecer la dosis a aplicar al suelo de cultivo.

3.6. Análisis de las muestras del cultivo

Se consideró como zona de amortiguamiento una extensión periférica de 288 m² para cada bloque, por lo que el área útil de medición y toma de datos ha sido de 36 m², localizada en la zona céntrica de cada bloque. En esta área, y para cada bloque, se seleccionaron 15 plantas de maíz para realizar las mediciones experimentales.

En la figura 1, se observa el esquema de la zona de muestreo para cada bloque. En las 15 plantas seleccionadas en cada bloque, y para ambas cosechas, se midieron las siguientes variables: diámetro del tallo de las plantas, altura de las plantas, longitud de las mazorcas, diámetro de las mazorcas, cantidad de hileras por mazorca, granos por hilera de mazorca y granos por mazorca.

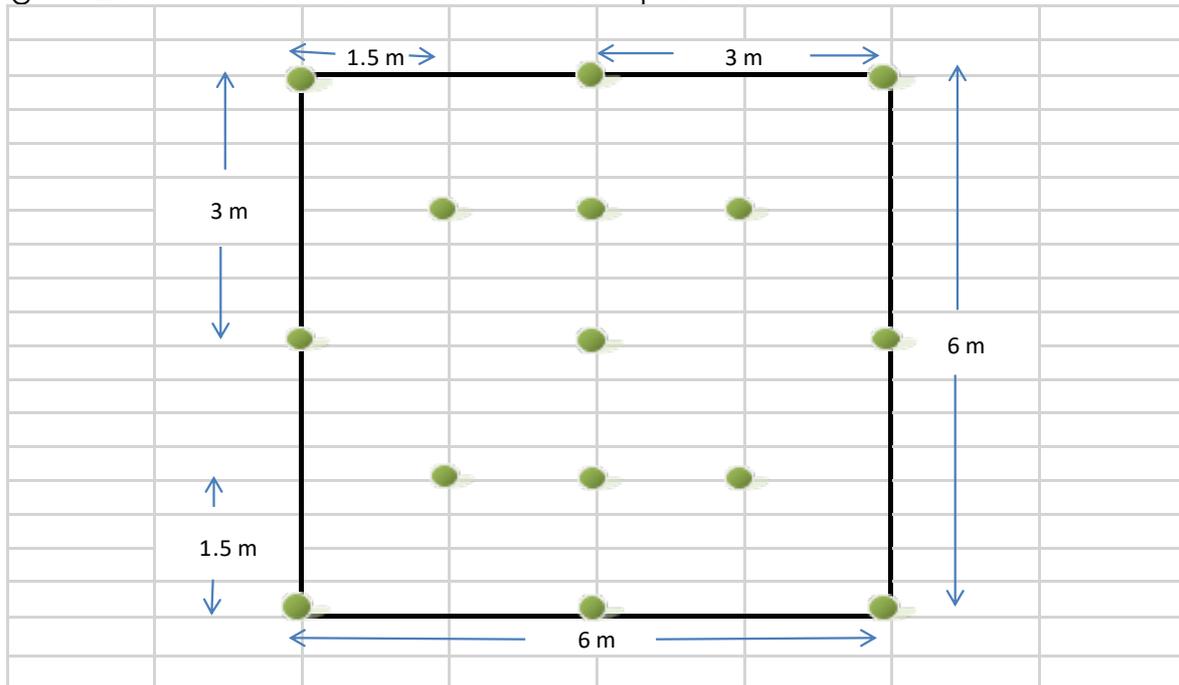
Figura 1. Esquema de la zona de muestreo en cada bloque.



Fuente: elaboración propia.

En la figura 2 se indica la distribución seguida para seleccionar las 15 plantas de la zona de muestreo.

Figura 2. Muestra de la distribución de las plantas.



Fuente: elaboración propia.

3.7. Descripción del proceso de experimentación

El proceso de toma de datos (experimentación) y evaluación del cultivo de maíz se realizó para las dos cosechas. La primera cosecha se realizó desde noviembre de 2017 a febrero 2018. Previamente a la siembra, se realizaron los primeros análisis al suelo y a los biosólidos. El cultivo correspondiente a la segunda cosecha se realizó desde el mes de septiembre de 2018 hasta el mes de enero de 2019. De igual manera, previo a la realización de la segunda siembra del maíz, se realizaron los segundos análisis al suelo y a los biosólidos utilizados para la fertilización de los bloques experimentales III, IV y V.

3.8. Herramientas de análisis de datos

Los datos referentes a los dos análisis realizados al suelo y a los dos análisis realizados a los biosólidos fueron suministrados por las empresas contratadas para tal fin. Posteriormente, la información se tabuló en el paquete Microsoft Excel 2016. Una vez finalizada la tabulación, los datos se traspasaron al programa IBM SPSS v. 24 para el correspondiente análisis estadístico.

En relación a los datos obtenidos relativos al cultivo de maíz (las plantaciones y frutos), se anotaron las variables, en primer lugar, en un cuaderno de notas. Posteriormente, los datos se tabularon en el paquete Microsoft Excel 2016. Una vez finalizada la tabulación, los datos se analizaron, también, con el programa IBM SPSS v. 24.

Con el programa IBM SPSS se realizaron los siguientes análisis:

- Test Kolgomorov-Smirnov: es una prueba no paramétrica que determina la bondad de ajuste de dos distribuciones de probabilidad entre sí.
- Prueba de rangos con signo de Wilcoxon: es una prueba no paramétrica para comparar el rango medio de dos muestras relacionadas y determinar si existen diferencias entre ellas.
- Medias: es el promedio de un conjunto de datos.
- Porcentajes: cantidad que representa la proporcionalidad de una parte respecto a un total que se considera dividido en cien unidades.
- Coeficiente de correlación Pearson: es la medida de la magnitud de la asociación lineal entre dos variables que no depende de las unidades de medida de las variables.
- ANOVA: es un análisis de la varianza que permite probar hipótesis referidas a dos o más distribuciones.

Los gráficos que se muestran en el apartado de resultados se han realizado mediante el paquete Microsoft Excel 2016.

4. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este apartado se divide en cuatro partes. En primer lugar, se presentan los resultados correspondientes al análisis de los suelos. Posteriormente, se muestran los datos sobre los análisis de los biosólidos utilizados. A continuación, se describen los resultados de los cultivos de maíz sembrados en cada uno de los cinco bloques experimentales. Por último, se realiza una discusión de los resultados.

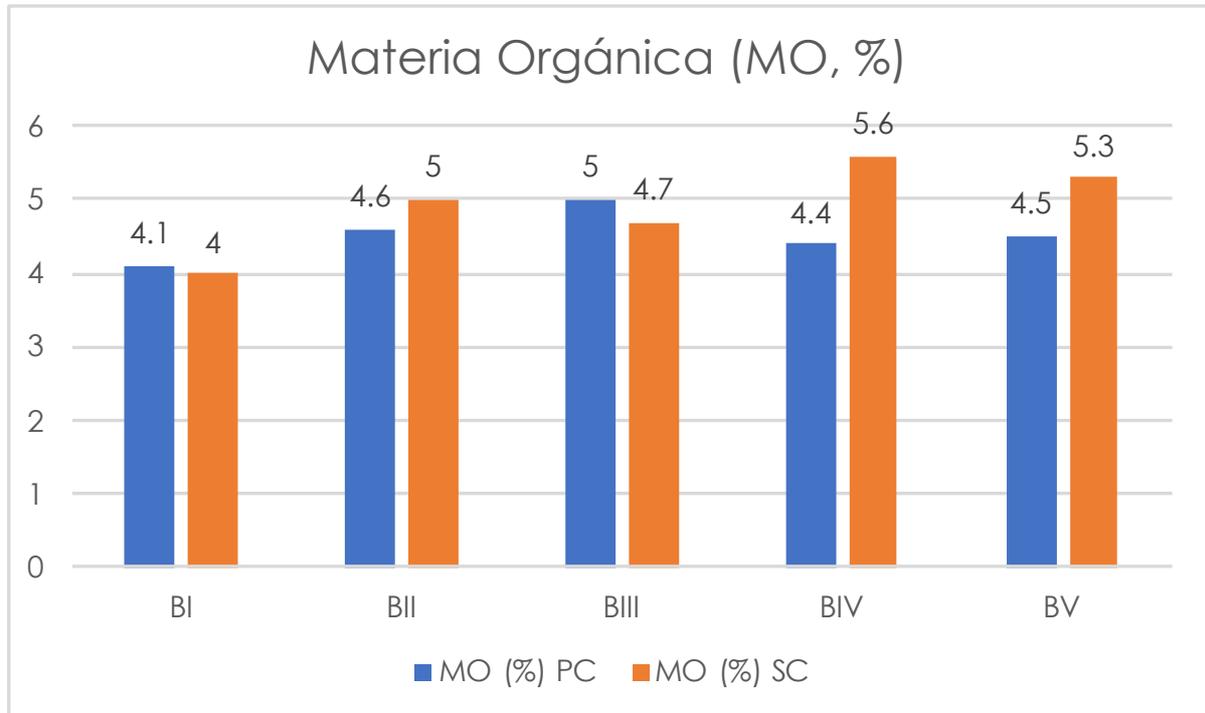
4.1. Análisis del suelo

A fin de cumplir con el objetivo de determinar el potencial aprovechable de los biosólidos a partir de sus características físicas, químicas y microbiológicas, en primer lugar, se analizaron los suelos donde se desarrolló el cultivo de maíz. A continuación, se presentan los resultados para cada una de las variables del suelo analizadas.

En la figura 3, se muestra el porcentaje de materia orgánica (MO) existente en el suelo. Se observa que esta mantiene niveles muy similares en cada análisis y en cada bloque, correspondientes a valores que oscilan entre 4-5.6%. Para el primer análisis, los valores de MO indican una secuencia de abundancia de Bloque III > Bloque II > Bloque V > Bloque IV > Bloque I. Para el segundo análisis, los valores de MO indican una secuencia de abundancia de Bloque IV > Bloque V > Bloque II > Bloque III > Bloque I. La valoración promedio de la MO del suelo es de 4.5% para la primera cosecha y de 4.9% para la segunda

cosecha. A nivel general, el suelo utilizado para ambas cosechas tiene un promedio de un 4.7% de MO.

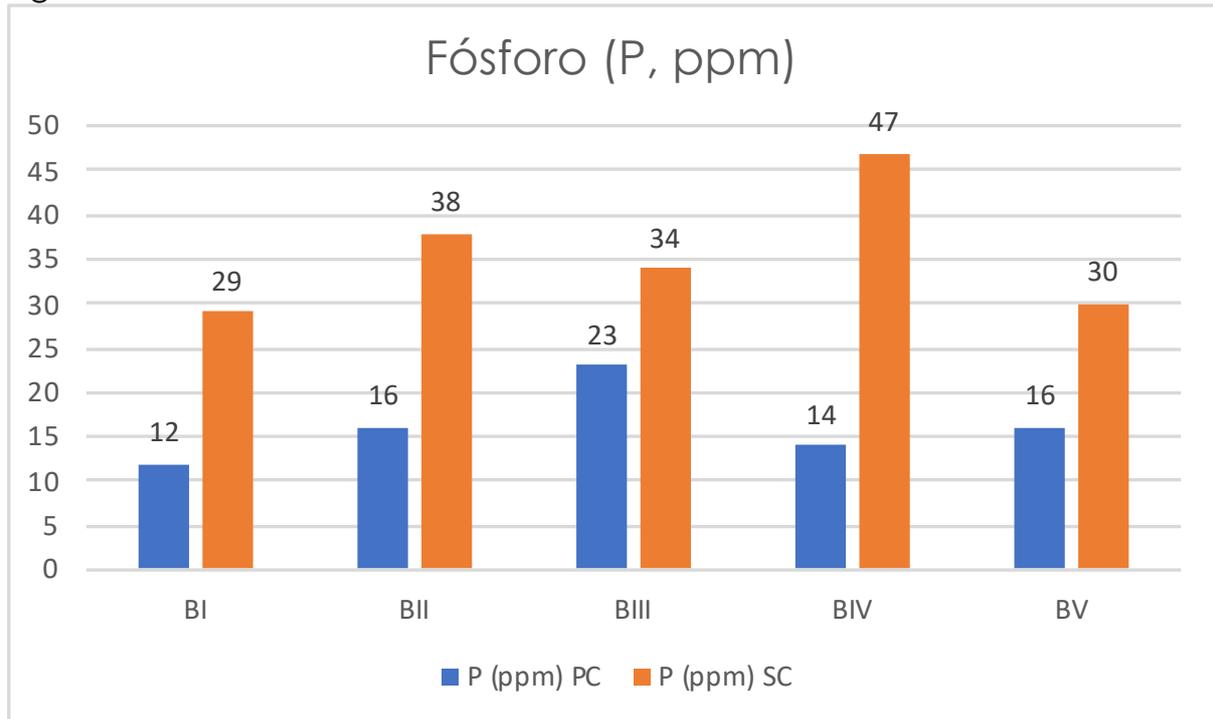
Figura 3. MO del suelo para la primera y segunda cosecha



Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

La figura 4 muestra los valores de fósforo (P) obtenidos en el suelo. Se observa que mantiene niveles diferentes para cada bloque y cosecha. En el primer análisis, los valores de P indican una secuencia de abundancia de Bloque III > Bloque V y II > Bloque IV > Bloque I. En el segundo análisis, los valores de P indican una secuencia de abundancia de Bloque IV > Bloque II > Bloque III > Bloque V > Bloque I. El valor promedio del P en el suelo es de 16.2 ppm para la primera cosecha y de 35.6 ppm para la segunda cosecha.

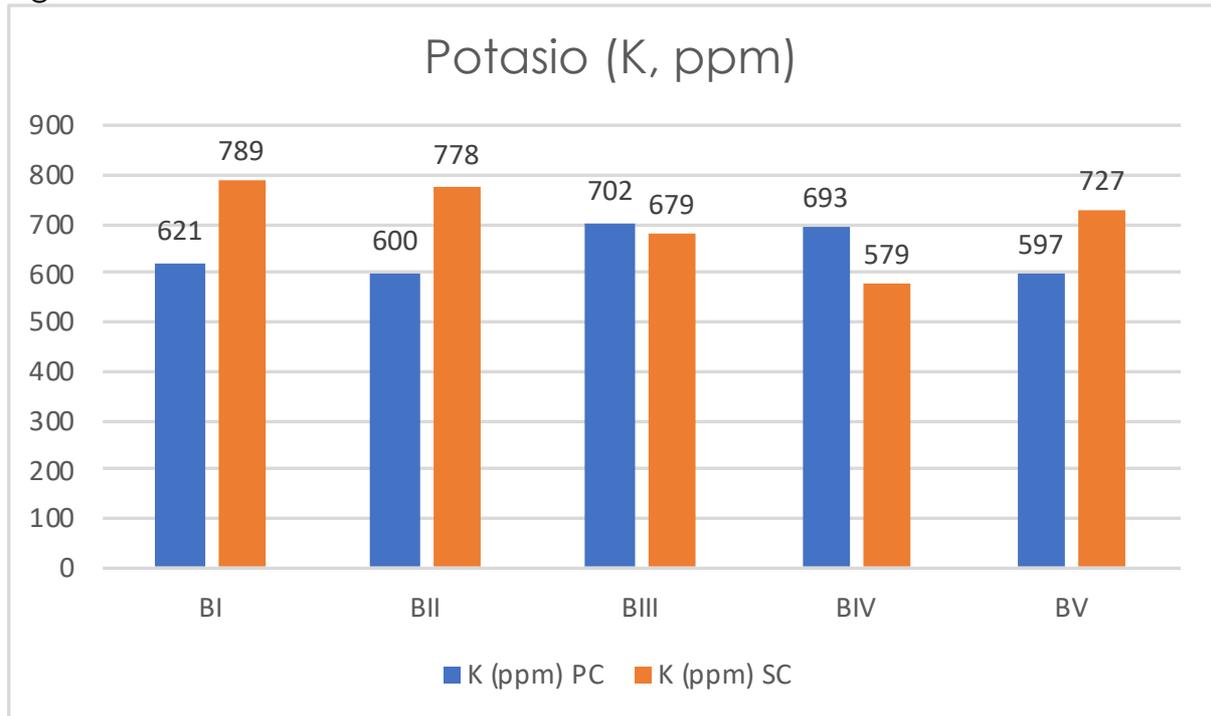
Figura 4. Valores de P en el suelo



Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

En la figura 5, se muestran los valores de potasio (K) obtenidos en el suelo. Se observa que mantienen valores diferentes, oscilando entre los 579 ppm y los 789 ppm. En el primer análisis, los valores de K indican una secuencia de abundancia de Bloque III > Bloque IV > Bloque I > Bloque II > Bloque V. En el segundo análisis, los valores de K indican una secuencia de abundancia de Bloque I > Bloque II > Bloque V > Bloque III > Bloque IV. El valor promedio del K en el suelo es de 642.6 ppm para la primera cosecha, y de 710.4 ppm para la segunda cosecha.

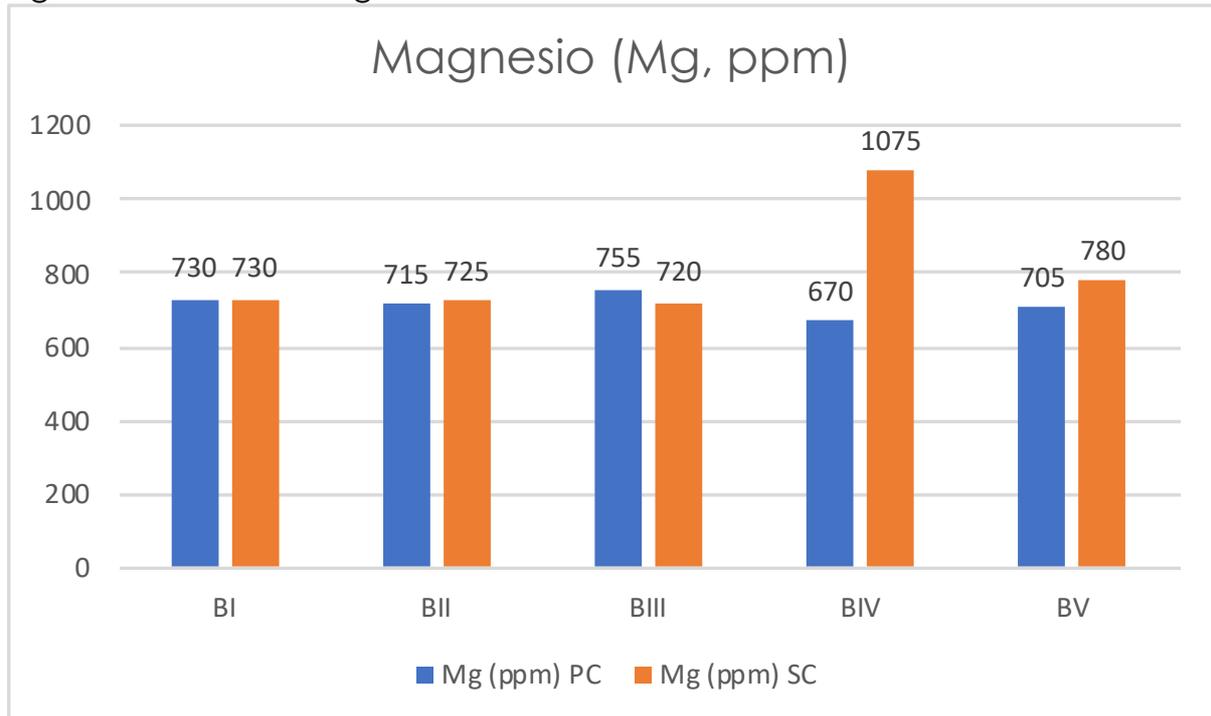
Figura 5. Valores de K en el suelo



Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

La figura 6 muestra los valores de magnesio (Mg) obtenidos en el suelo. Se observa que se mantienen valores similares en el análisis previo a cada siembra, a excepción del bloque IV. En el primer análisis, los valores de Mg indican una secuencia de abundancia de Bloque III > Bloque I > Bloque II > Bloque V > Bloque IV. En el segundo análisis, los valores de Mg indican una secuencia de abundancia de Bloque IV > Bloque V > Bloque I > Bloque II > Bloque III. El valor promedio del Mg en el suelo es de 715 ppm para la primera cosecha, y de 806 ppm para la segunda cosecha.

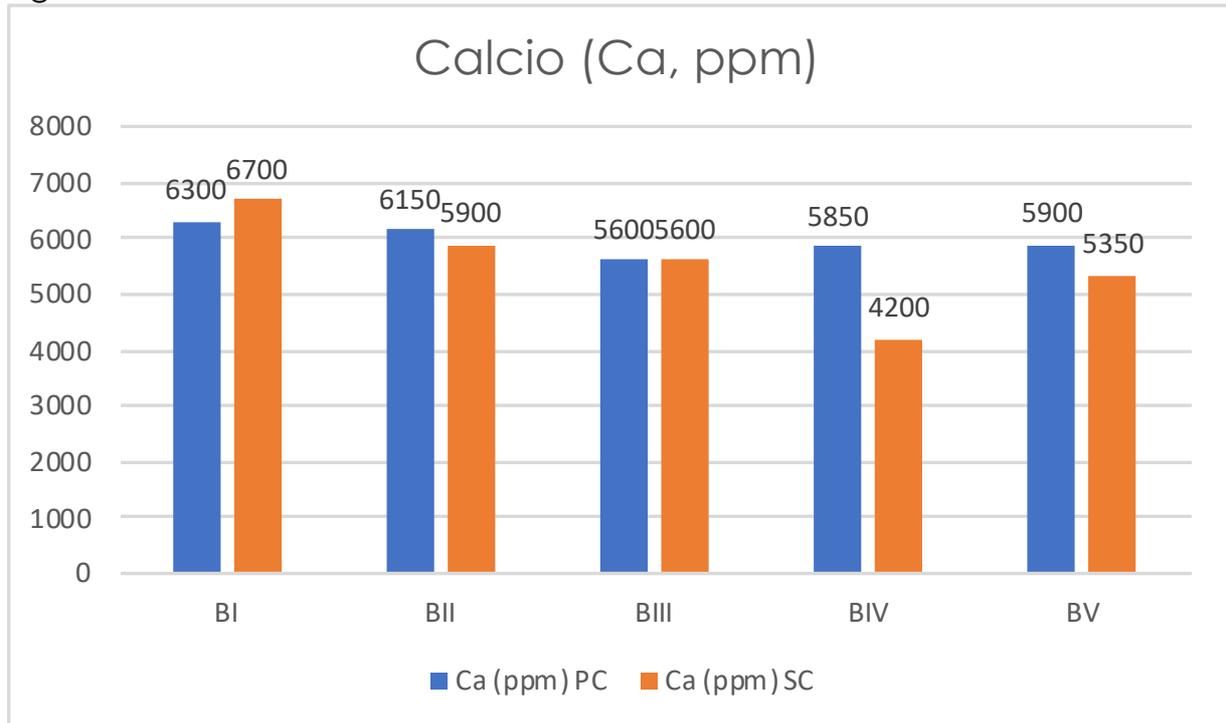
Figura 6. Valores de Mg en el suelo



Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

En la figura 7 se muestran los valores de calcio (Ca) obtenidos en el suelo. Se observa que mantienen valores similares en el análisis previo a cada siembra, a excepción del bloque IV. En el primer análisis, los valores de Ca indican una secuencia de abundancia de Bloque I > Bloque II > Bloque V > Bloque IV > Bloque III. En el segundo análisis, los valores de Ca indican una secuencia de abundancia de Bloque I > Bloque II > Bloque III > Bloque V > Bloque IV. El valor promedio del Ca en el suelo es de 5960 ppm para la primera cosecha, y de 5550 ppm para la segunda cosecha.

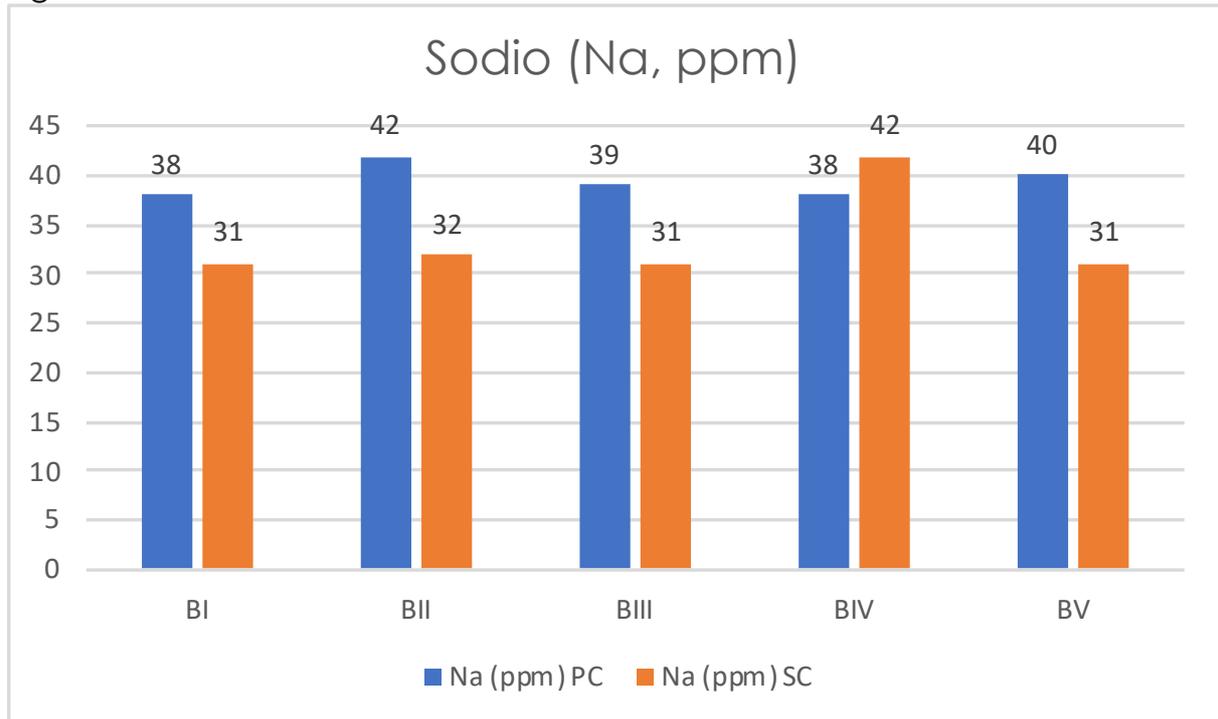
Figura 7. Valores de Ca en el suelo



Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

La figura 8 muestra los valores de sodio (Na) obtenidos en el suelo. Se observa que mantienen valores similares en el análisis previo a cada siembra, comprendidos entre 31ppm y 42ppm. En el primer análisis, los valores de Na indican una secuencia de abundancia de Bloque II > Bloque V > Bloque III > Bloque I y IV. En el segundo análisis, los valores de Na indican una secuencia de abundancia de Bloque IV > Bloque II > Bloque I, III y V. El valor promedio del Na en el suelo es de 39.4 ppm para la primera cosecha, y de 33.4 ppm para la segunda cosecha.

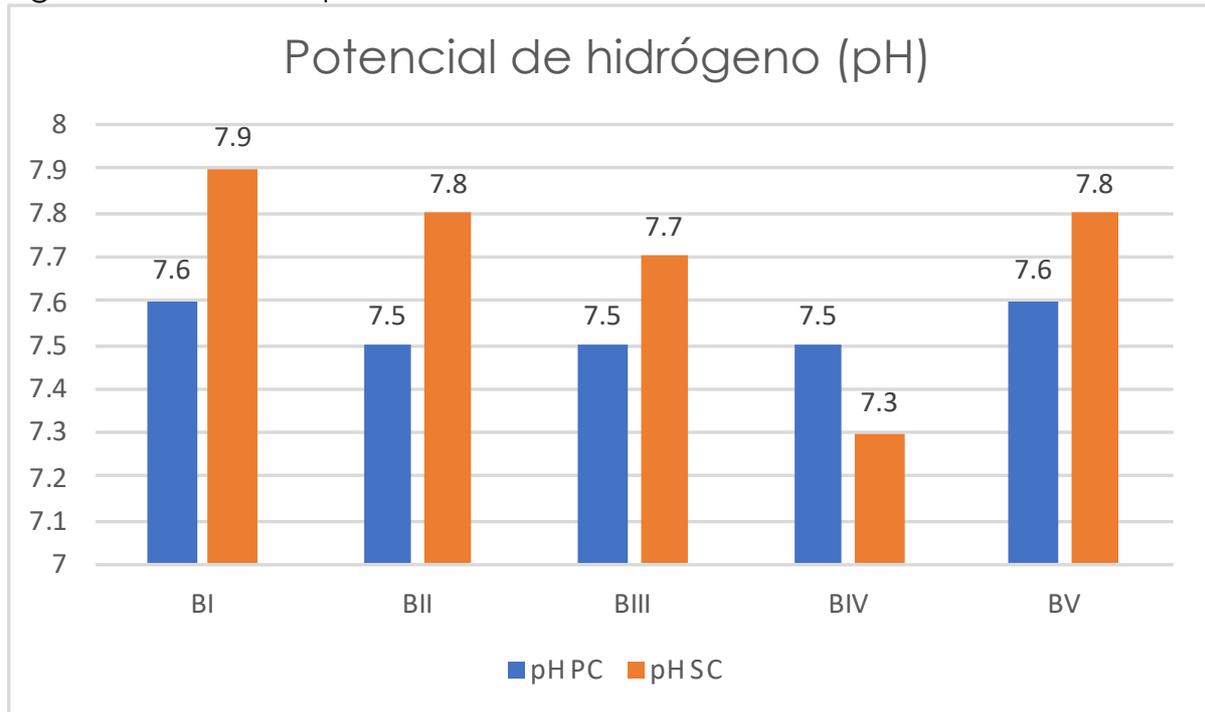
Figura 8. Valores de Na en el suelo



Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

En la figura 9 se muestran los valores de pH obtenidos en el suelo. Se observa que mantienen valores similares en el análisis previo a la primera siembra de maíz y existe variación en los valores obtenidos, para cada bloque, en el análisis previo a la segunda siembra. Todos los valores oscilan entre 7.3 y 7.9. En el primer análisis, los valores de pH indican una secuencia de abundancia de Bloque I y V > Bloque II, III y IV. En el segundo análisis, los valores de pH indican una secuencia de abundancia de Bloque I > Bloque II y V > Bloque III > Bloque IV. El valor promedio del pH en el suelo es de 7.5 para el cultivo en la primera cosecha, y de 7.7 para el cultivo de la segunda cosecha.

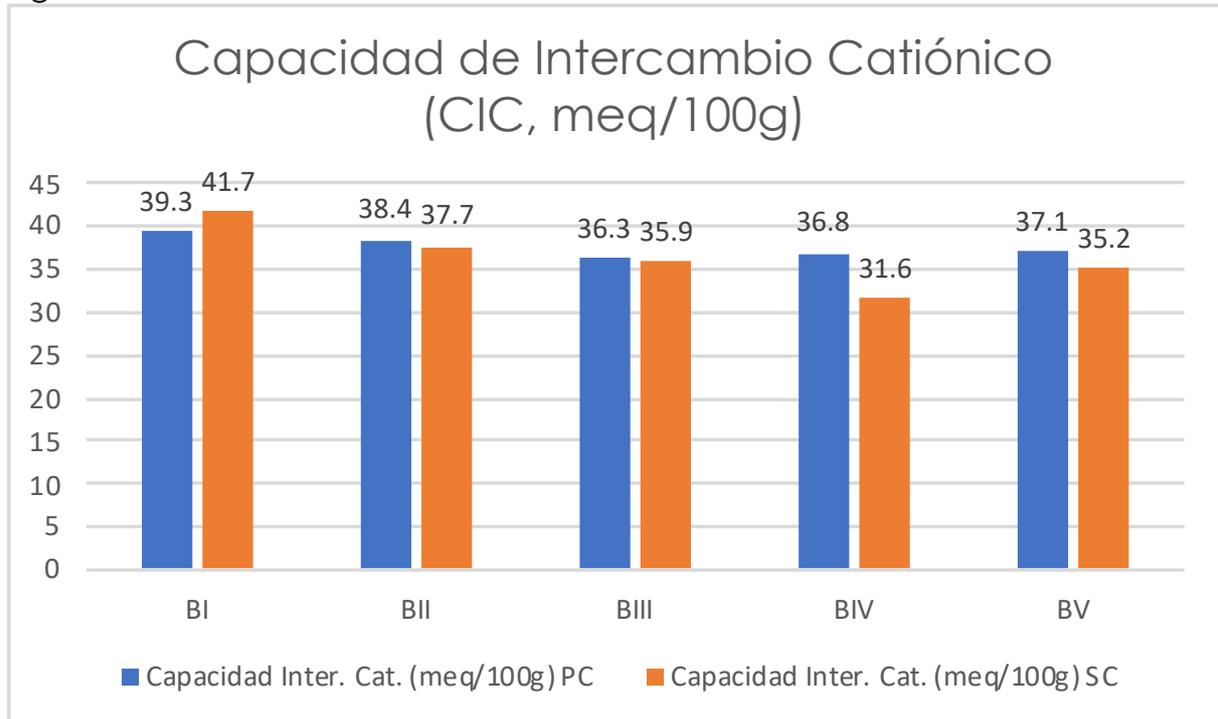
Figura 9. Valores de pH en el suelo



Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

La figura 10 muestra los valores referentes a la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo. Se observan valores muy similares en ambos análisis y bloques, oscilando entre 31.6meq/100g y 41.7meq/100g. En el primer análisis, los valores de la CIC indican una secuencia de abundancia de Bloque I > Bloque II > Bloque V > Bloque IV > Bloque III. En el segundo análisis, los valores de la CIC indican una secuencia de abundancia de Bloque I > Bloque II > Bloque III > Bloque V > Bloque IV. El valor promedio de la CIC es de 37.6 meq/100 para el cultivo en la primera cosecha, y de 36.4 meq/100g para el cultivo en la segunda cosecha.

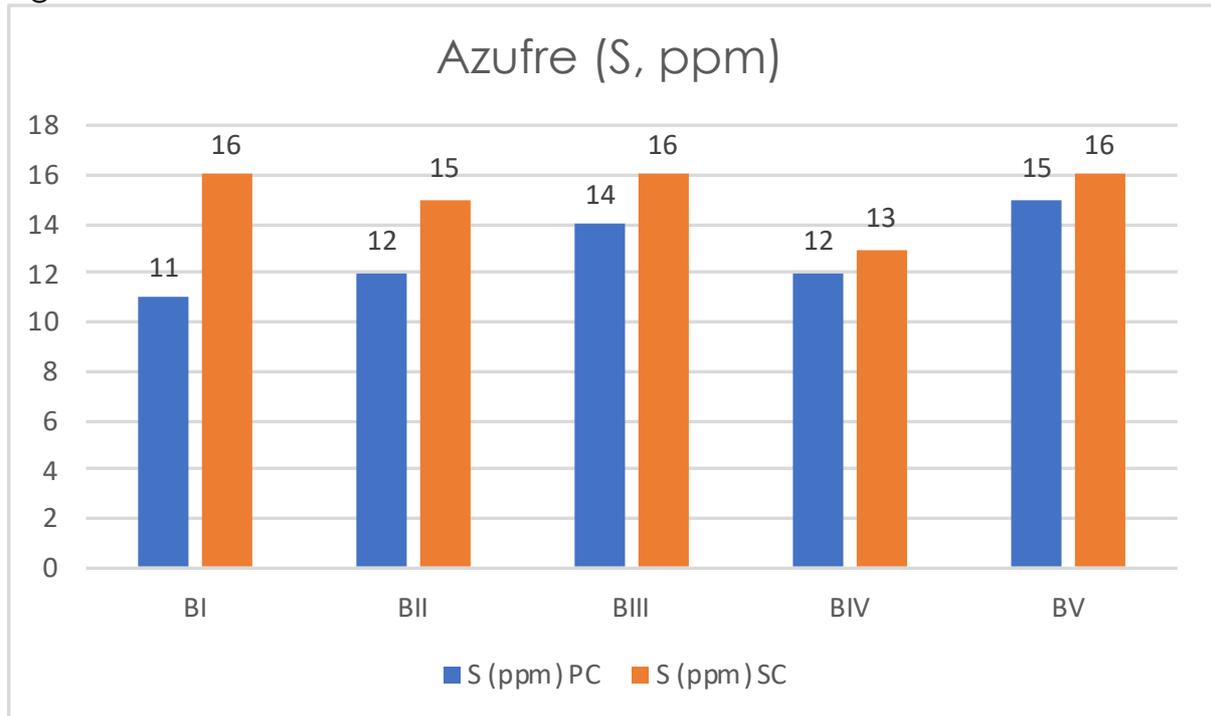
Figura 10. Valores de la CIC en el suelo



Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

En la figura 11 se muestran los valores de azufre (S) obtenidos en el suelo. Se observa que mantienen valores similares en el análisis previo a cada siembra. En el primer análisis, los valores de S indican una secuencia de abundancia de Bloque V > Bloque III > Bloque II y IV > Bloque I. En el segundo análisis, los valores de S indican una secuencia de abundancia de Bloque I, III y V > Bloque II > Bloque IV. El valor promedio del S en el suelo es de 12.8 ppm para la primera cosecha, y de 15.2 ppm para la segunda cosecha.

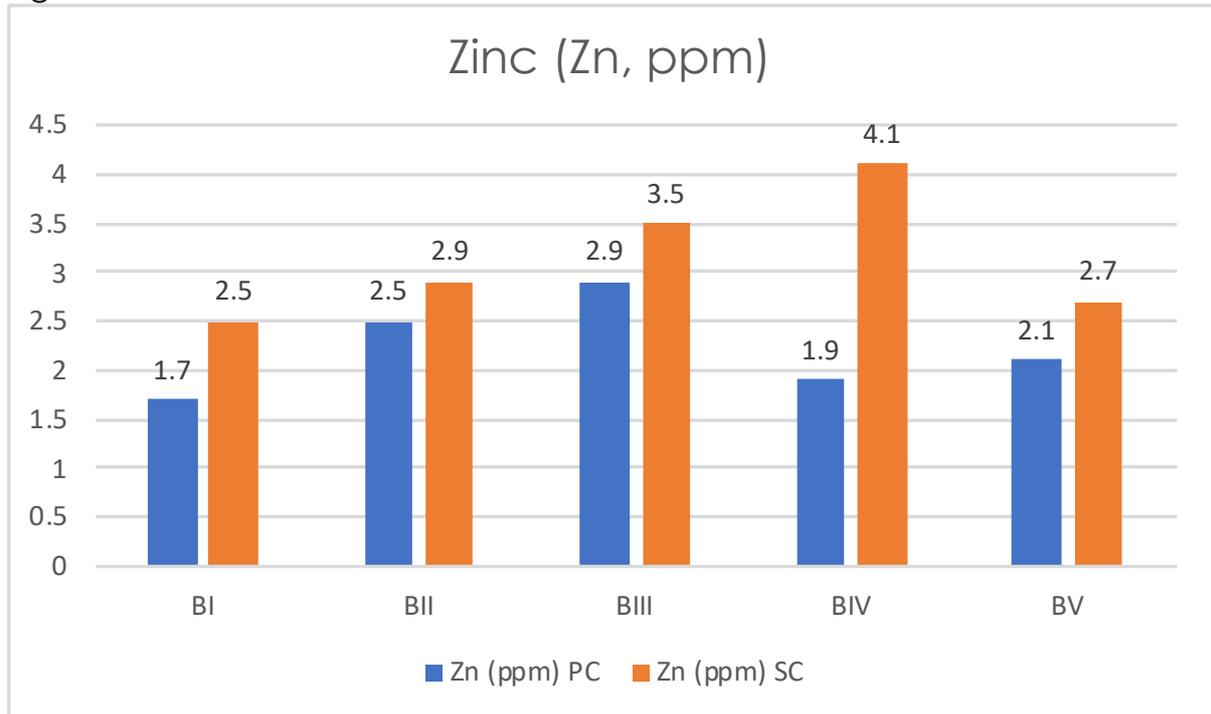
Figura 11. Valores de S en el suelo



Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

La figura 12 muestra los valores de zinc (Zn) obtenidos en el suelo. Se observan valores diferentes en cada análisis y bloque. En el primer análisis, los valores de Zn indican una secuencia de abundancia de Bloque IV > Bloque III > Bloque II > Bloque V > Bloque I. En el segundo análisis, los valores de Zn indican una secuencia de abundancia de Bloque IV > Bloque III > Bloque II > Bloque V > Bloque I. El valor promedio del Zn en el suelo es de 2.2 ppm para la primera cosecha, y de 3.1 ppm para la segunda cosecha.

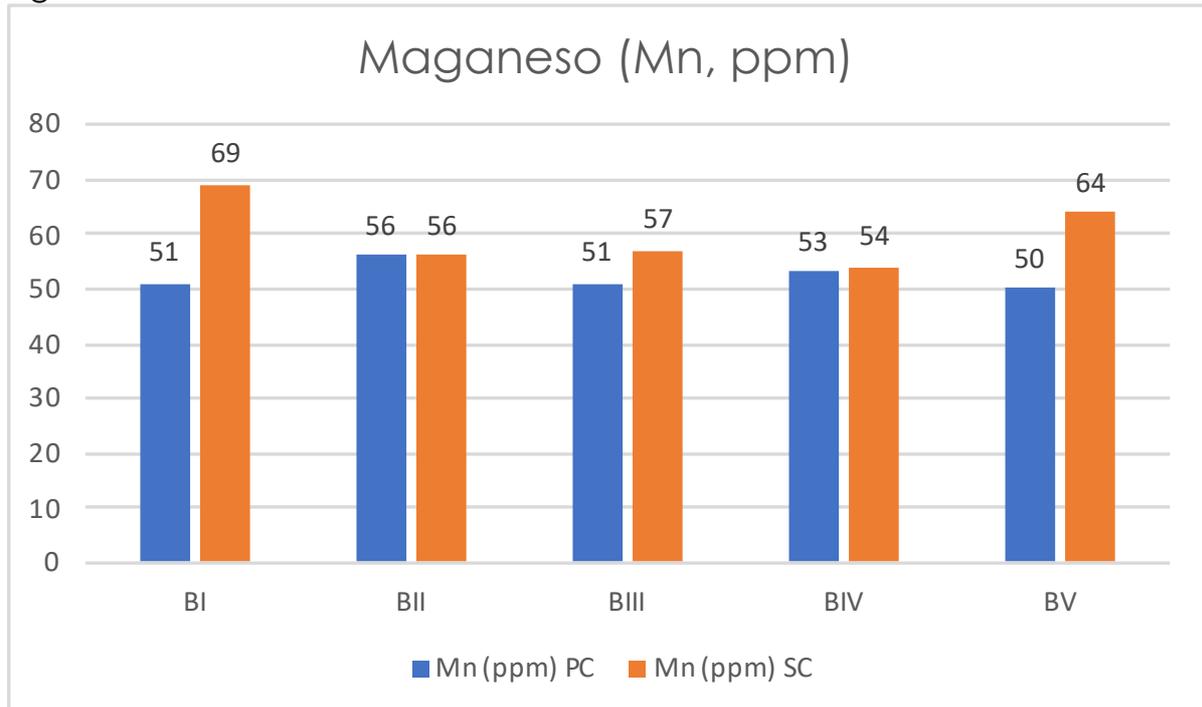
Figura 12. Valores de Zn en el suelo



Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

En la figura 13 se muestran los valores de manganeso (Mn) localizados en el suelo. Se observa que los bloques II y IV mantienen valores similares, y entre los demás bloques existen más diferencias. En el primer análisis, los valores de Mn indican una secuencia de abundancia de Bloque II > Bloque IV > Bloque I y III > Bloque V. En el segundo análisis, los valores de Mn indican una secuencia de abundancia de Bloque I > Bloque V > Bloque III > Bloque II > Bloque IV. El valor promedio del Mn en el suelo es de 52.2 ppm para la primera cosecha, y de 60 ppm para la segunda cosecha.

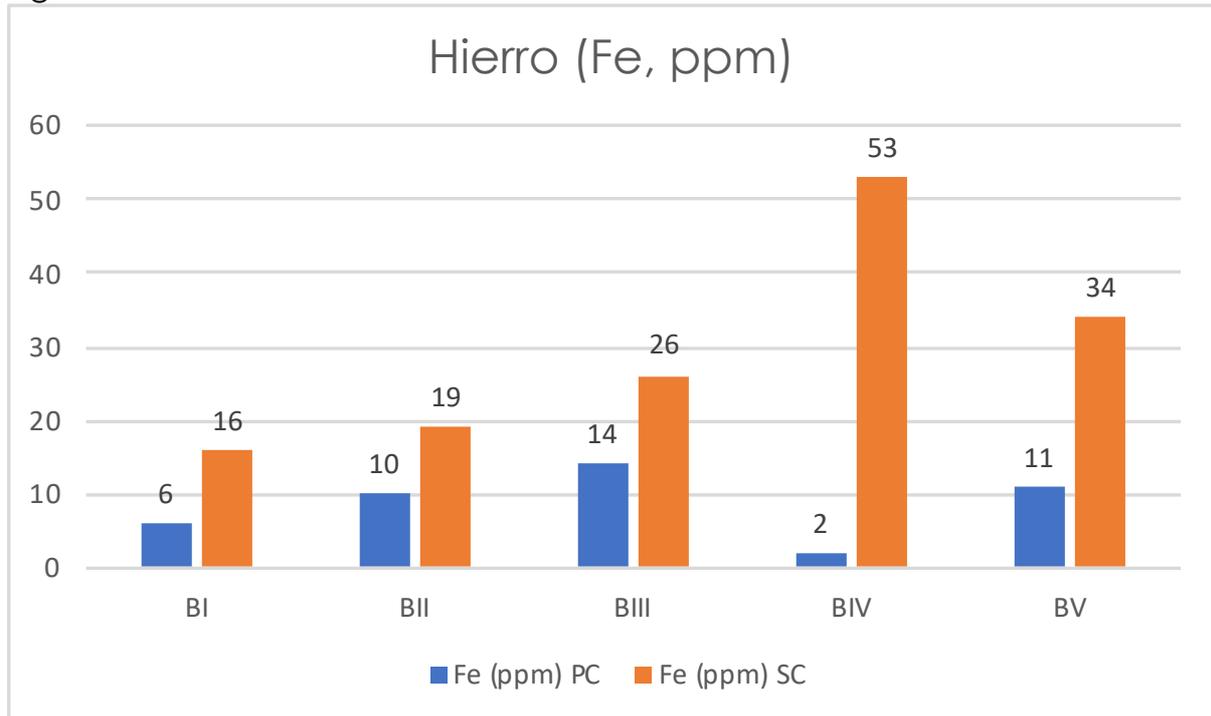
Figura 13. Valores de Mn en el suelo



Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

La figura 14 muestra los valores de hierro (Fe) obtenidos en el suelo. Se observan diferencias significativas entre los dos análisis. En el primer análisis, los valores de Fe indican una secuencia de abundancia de Bloque III > Bloque V > Bloque II > Bloque I > Bloque IV. En el segundo análisis, los valores de Fe indican una secuencia de abundancia de Bloque IV > Bloque V > Bloque III > Bloque II > Bloque I. El valor promedio del Fe en el suelo es de 8.6 ppm para la primera cosecha, y de 29.6 ppm para la segunda cosecha.

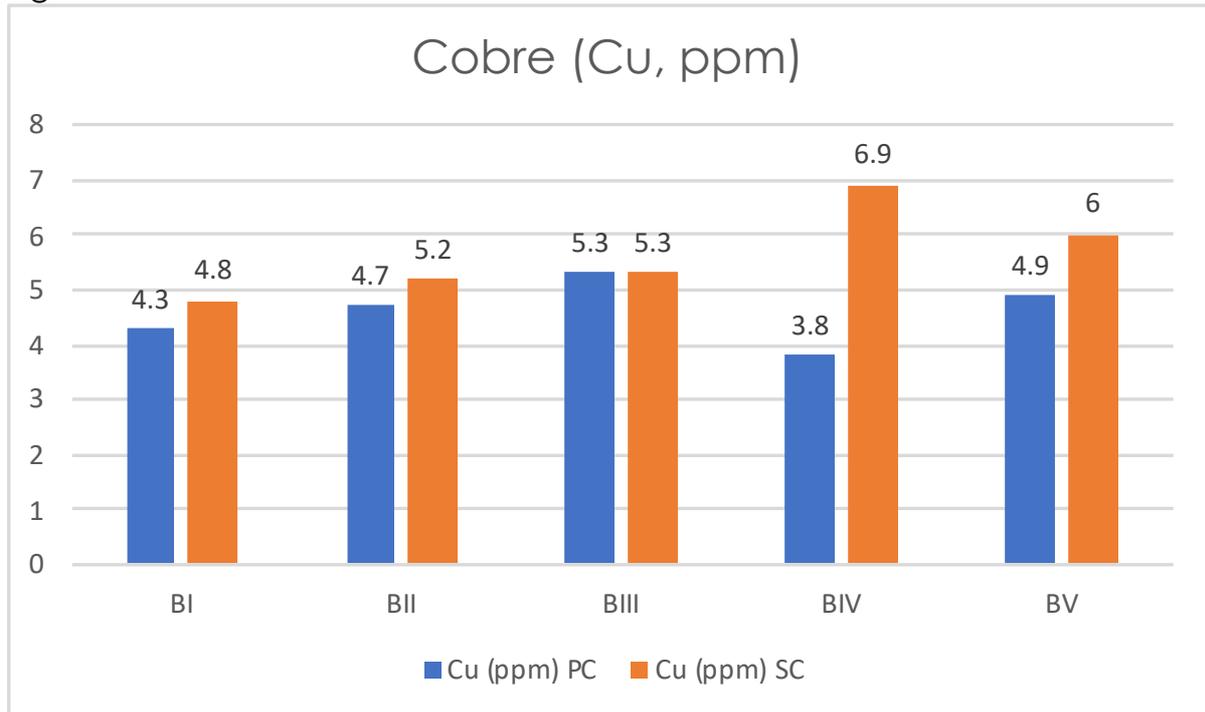
Figura 14. Valores de Fe en el suelo



Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

En la figura 15 se muestran los valores de cobre (Cu) obtenidos en el suelo. Se observan diferencias significativas entre los análisis del bloque IV y V, siendo los valores más similares en los demás bloques. En el primer análisis, los valores de Cu indican una secuencia de abundancia de Bloque III > Bloque V > Bloque II > Bloque I > Bloque IV. En el segundo análisis, los valores de Cu indican una secuencia de abundancia de Bloque IV > Bloque V > Bloque III > Bloque II > Bloque I. El valor promedio del Cu en el suelo es de 4.6 ppm para la primera cosecha, y de 5.6 ppm para la segunda cosecha.

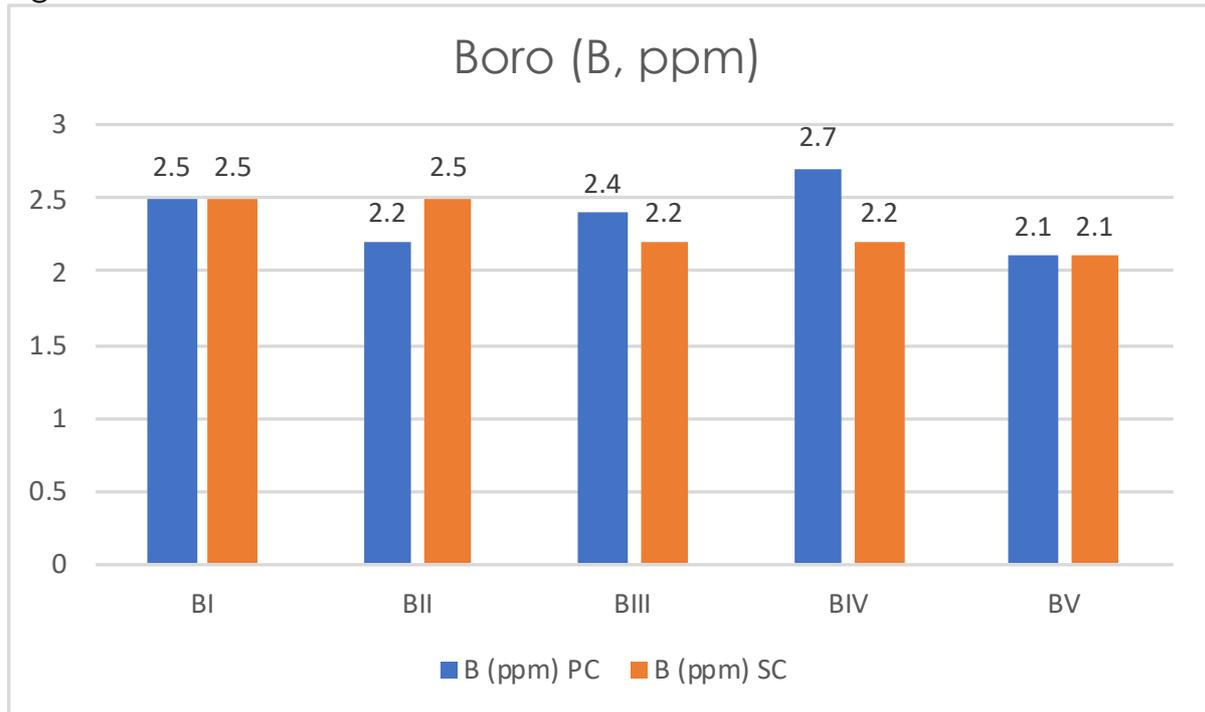
Figura 15. Valores de Cu en el suelo



Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

La figura 16 muestra los valores de boro (B) obtenidos en el suelo. No se observan diferencias significativas entre los dos análisis, a excepción del bloque IV. En el primer análisis, los valores de B indican una secuencia de abundancia de Bloque IV > Bloque I > Bloque III > Bloque II > Bloque V. En el segundo análisis, los valores de B indican una secuencia de abundancia de Bloque IV > Bloque I > Bloque III > Bloque II > Bloque V. El valor promedio de B en el suelo es de 2.4 ppm para la primera cosecha, y de 2.3 ppm para la segunda cosecha.

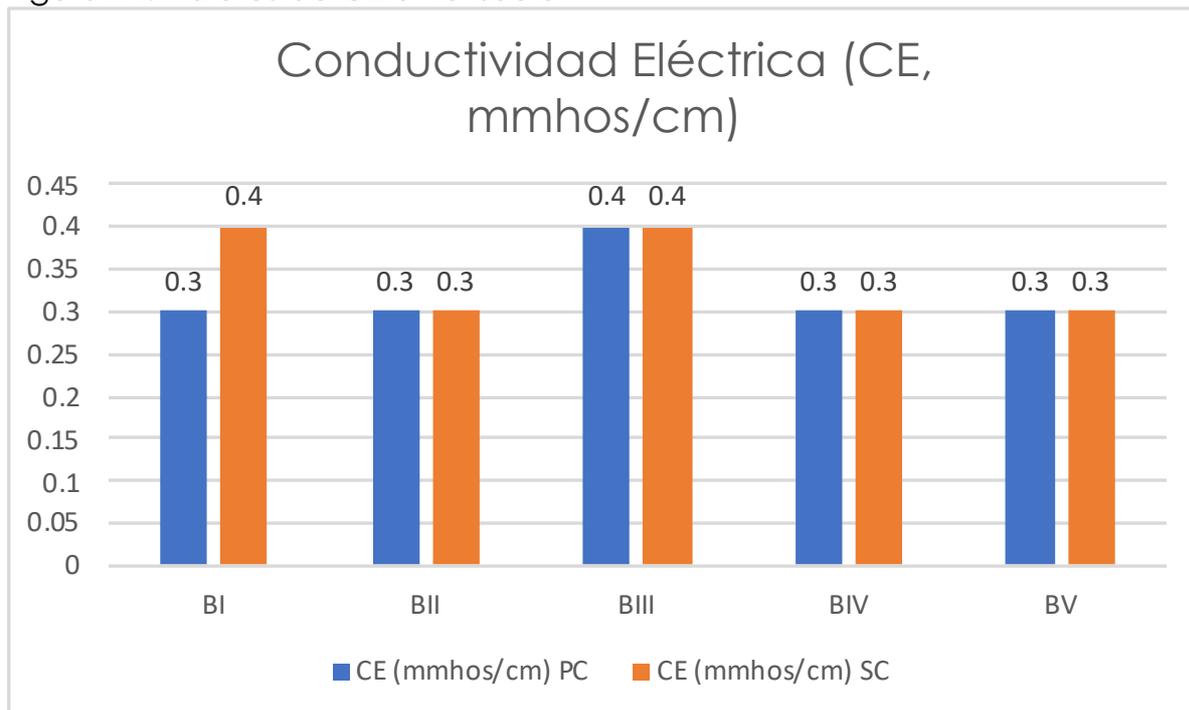
Figura 16. Valores de B en el suelo



Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

En la figura 17 se muestran los valores de la Conductividad Eléctrica (CE) obtenida en el suelo. No se observan diferencias significativas entre los dos análisis. En el primer análisis, los valores de la CE indican una secuencia de abundancia de Bloque III > Bloque I, II, IV y V. En el segundo análisis, los valores de CE indican una secuencia de abundancia de Bloque I y III > Bloque II, IV y V. El valor promedio de la CE en el suelo es de 0.32 mmhos/cm para la primera cosecha, y de 0.34 mmhos/cm para la segunda cosecha.

Figura 17. Valores de CE en el suelo



Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

En relación a los valores mostrados en las figuras anteriores, se ha realizado la tabla 3. Para cada parámetro analizado, se ha realizado una clasificación por bloque, puntuándose el bloque que mejor valor tiene con un 5, el segundo mejor con un 4, el siguiente con un 3, el siguiente con un 2 y, el último valor, con un 1. Cuando los bloques tienen el mismo valor, se le ha dado el puntaje de la misma posición. En este sentido, para el primer análisis, la suma de los valores otorgados a cada parámetro indica una secuencia de abundancia de Bloque III > Bloque II > Bloque V > Bloque I > Bloque IV. Para el segundo análisis, la suma de los valores nos indica una secuencia de abundancia de Bloque IV > Bloque I > Bloque II y V > Bloque III. A nivel general de los bloques, se observa una secuencia de abundancia de Bloque III > Bloque II > Bloque IV > Bloque I y V.

Tabla 3. Análisis de los valores de los parámetros en cada bloque

	Bloque I		Bloque II		Bloque III		Bloque IV		Bloque V	
	PC	SC	PC	SC	PC	SC	PC	SC	PC	SC
MO	1	1	4	3	5	2	2	5	3	4
P	2	1	4	4	5	3	3	5	4	2
K	3	5	2	4	5	2	4	1	1	3
Mg	4	3	3	2	5	1	1	5	2	4
Ca	5	5	4	4	1	3	2	1	3	2

Na	2	3	5	4	3	3	2	5	4	3
pH	5	5	4	4	4	3	4	2	5	4
CIC	5	5	4	4	1	3	2	1	3	2
S	2	5	3	4	4	5	3	3	5	5
Zn	1	1	3	3	4	4	5	5	2	2
Mn	3	5	5	2	3	3	4	1	2	4
Fe	2	1	3	2	5	3	1	5	4	4
Cu	2	1	3	2	5	3	1	5	4	4
B	4	4	2	2	3	3	5	5	1	1
CE	4	5	4	4	5	5	4	4	4	4
Total	45	50	53	48	58	46	43	53	47	48
Total bloque	95		101		104		96		95	

Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

La tabla 4 indica en que análisis del suelo tenía una mayor representatividad cada uno de los parámetros. Se observa que el 73.3 % de los parámetros analizados se obtienen en mayor representatividad en el segundo análisis, después de recolectar la primera cosecha. Estos resultados podrían deberse a los nutrientes aportados por los biosólidos utilizados para fertilizar los bloques durante la primera cosecha.

Tabla 4. Análisis de los valores por análisis

	¿Mayor representatividad?	
	PC	SC
MO		X
P		X
K		X
Mg		X
Ca	X	
Na	X	
pH		X
CIC	X	
S		X
Zn		X
Mn		X
Fe		X
Cu		X
B	X	
CE		X

%	26.7%	73.3%
---	-------	-------

Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

En la tabla 5 se muestran los valores relacionados con la saturación (K, Mg y Ca) y sus relaciones. Siguiendo la literatura científica (Molina y Meléndez, 2002), se observa que la saturación y la relación de Ca/Mg, Mg/K y Ca+Mg/K poseen valores óptimos para el desarrollo del cultivo.

Tabla 5. Análisis de muestras de suelo tomadas en bloques experimentales

Muestra	Saturación						Al	Relaciones					
	K		Mg		Ca			Ca/Mg		Mg/k		Ca + Mg/k	
	PC	SC	PC	SC	PC	SC		PC	SC	PC	SC	PC	SC
BI	4.0	4.8	15.5	14.6	80.1	80.3	1	5.2	5.6	3.8	3.0	23.6	19.5
BII	4.0	5.3	15.5	16.0	80.0	78.3	< 1	5.2	4.9	3.8	3.0	23.8	17.8
BIII	5.0	4.9	17.4	16.7	77.2	78.0	< 1	4.5	4.7	3.5	3.4	19.0	19.5
BIV	4.8	4.7	15.2	28.3	79.5	66.4	< 1	5.3	2.4	3.1	6.0	19.6	20.1
BV	4.1	5.3	15.8	18.4	79.5	75.9	< 1	5.1	4.2	3.8	3.4	23.1	17.8

Fuente: elaboración propia. PC: valor del parámetro del suelo en muestra analizada para la primera cosecha de maíz; SC: valor del parámetro del suelo en muestra analizada para la segunda cosecha de maíz.

En relación a los datos anteriores, se calculó la dosis de biosólidos a aplicar en cada cosecha. En este sentido, se tomó como base una demanda de nitrógeno (N) del cultivo de 189 kg/ha y un aporte del suelo de 176 kg/ha. A partir de estos valores, se estableció una dosis de 15 t/ha de biosólidos para la primera cosecha, la cual fue aplicada a los bloques III, IV y V. Para la segunda cosecha, se duplicó la dosis de biosólidos, es decir, se aplicaron a cada uno de los tres bloques (III, IV y V) unas 30 t/ha. En ambas cosechas, en los bloques III y IV se aplicó el biosólido al suelo a los 15 días de realizada la siembra del maíz; en el caso del bloque V, se aplicó justo antes de realizar cada siembra.

4.2. Análisis de los biosólidos

Siguiendo la recomendación de Jorba *et al.* (2013), y antes del análisis de los metales pesados, se ha procedido a realizar la prueba de normalidad de Kolgomorov-Smirnov (tabla 6). En este sentido, se observa que los datos no siguen una distribución normal (sig. < 0,05).

Tabla 6. Prueba de Komogorov-Snirnov para una muestra

		Biosólidos para la PC	Biosólidos para la SC
Parámetros analizados (N)		8	8
Parámetros normales ^{a, b}	Media	97,4100	231,6125
	DE	206,70561	555,81538
Máximas diferencias extremas	Absoluta	0,366	0,447
	Positivo	0,366	0,447
	Negativo	-0,319	-0,338
Estadístico de prueba		0,366	0,447
Sig. Asintótica (bilateral)		0,002 ^c	0,000 ^c

Fuente: elaboración propia. DE: desviación estándar; PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha.

Al comprobar si existen o no diferencias significativas entre los datos, y tratándose de pruebas no paramétricas, se acude a la prueba de Wilcoxon (tabla 7). Según los datos obtenidos mediante esta prueba, no se observan diferencias significativas entre los metales pesados de los biosólidos utilizados para cada cosecha.

Tabla 7. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon

	N	Rango promedio	Suma de rangos
Rangos negativos	2 ^a	2,50	5,00
Rangos positivos	4 ^b	4,00	16,00
Empates	2 ^c		
Total	8		
Z		-1,153 ^b	
Sig. Asintótica (bilateral)		0,249	

Fuente: elaboración propia. a: $P_2 < P_1$; b: $P > P_1$; c: $P_2 = P_1$.

La tabla 8 muestra los valores de los metales pesados incluidos en los biosólidos utilizados para la primera y la segunda cosecha, así como los valores promedio de ambos análisis, el error y la desviación estándar. Los valores obtenidos se encuentran muy por debajo de los límites máximos permisibles. Esto indica que el biosólido producido en la PTAR Rafey, en referencia al contenido de metales pesados, es de excelente calidad.

Tabla 8. Valores obtenidos en el análisis de los metales pesados de los biosólidos de la PTAR Rafey

Metal Pesado	Análisis para PC (mg/kg)	Análisis para SC (mg/kg)	Media de los valores PC y SC (mg/kg)	Error estándar	Desviación estándar
As	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cd	2.58	1.09	1.83	0.74	1.05
Cr	602	1602	1102	500	707,10
Cu	40.1	87.01	63.55	23.45	33.17
Pb	11.5	12.2	11.85	0,35	0,49
Hg	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ni	21.1	19.6	20.35	0,75	1.06
Zn	102	131	116.5	14,50	20,50

Fuente: elaboración propia.

En este sentido, los valores promedio indican una secuencia de abundancia de $Cr > Zn > Cu > Ni > Pb > Cd$. No se encontraron valores representativos de As y Hg. De los demás parámetros a analizar, indicados en la tabla 2 del apartado de materiales y métodos, no se obtuvieron valores. Los datos de la desviación estándar muestran heterogeneidad en las variables analizadas y, por consiguiente, nos invitan a realizar más análisis descriptivos para conocer la relación entre las variables.

Entre los análisis más utilizados en la literatura científica para asociar metales pesados está el estudio de correlación de Pearson (Rivera *et al.*, 2008; Rivas *et al.*, 2012). En la tabla 9 se presenta el análisis de correlación de Pearson correspondiente al promedio de los valores de los biosólidos utilizados en la primera y segunda cosecha. Se puede observar que existe correlación positiva o negativa perfecta entre los diferentes metales pesados analizados. En este sentido, la existencia de correlación entre los metales nos indica que podrían tener el mismo origen de procedencia (Rivera *et al.*, 2008).

Tabla 9. Análisis de correlación entre los metales pesados

	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Zn
Cd	1					
Cr	-1000**	1				
Cu	-1000**	1000**	1			
Pb	-1000**	1000**	1000**	1	-	
Ni	-1000**	-1000**	-1000**	-1000**	1	
Zn	-1000**	1000**	1000**	1000**	-1000**	1

Fuente: elaboración propia. **La correlación es significativa en el nivel 0,01.

Los resultados presentados en la tabla 10, referente a los análisis realizados a las dos muestras del biosólido utilizado en la primera y en la segunda cosecha,

evidencian que el mismo es clase A. Para ello se ha analizado el indicador bacteriológico de contaminación, los patógenos y los parásitos.

Tabla 10. Valores obtenidos en el análisis de los patógenos y parásitos de los biosólidos de la PTAR Rafey utilizados en el cultivo del maíz

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación		Patógenos				Parásitos		
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	Valor en biosólido		salmonella spp. NMP/g en base seca (Norma Mex.)	Valor en biosólido		Huevos de helmintos/g en base seca (Norma Mex.)	Valor en biosólido	
		PC	SC		PC	SC		PC	PC
A	Menor de 1 000	1700	260	Menor de 3	Menor de 0.72	Menor de 0.3	Menor de 1(a)	Menor de 1	Menor de 1
B	Menor de 1 000			Menor de 3			Menor de 10		
C	Menor de 2 000 000			Menor de 300			Menor de 35		

Fuente: elaboración propia. PC: primera cosecha; SC: segunda cosecha. * (a) Huevos de helmintos viables * NMP número más probable.

De igual manera, a los biosólidos se les realizaron los análisis correspondientes a las pruebas CRETIB (corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico-infeccioso) verificándose, también, que es totalmente segura su utilización en la agricultura.

En la tabla 11 se muestran los valores correspondientes a los macro y micronutrientes contenidos en los biosólidos utilizados como fertilizantes para el cultivo del maíz. Se puede observar, tanto en la tabla 11 como en la figura 18, que los biosólidos utilizados para la segunda cosecha tienen valores superiores a los obtenidos en el primer análisis.

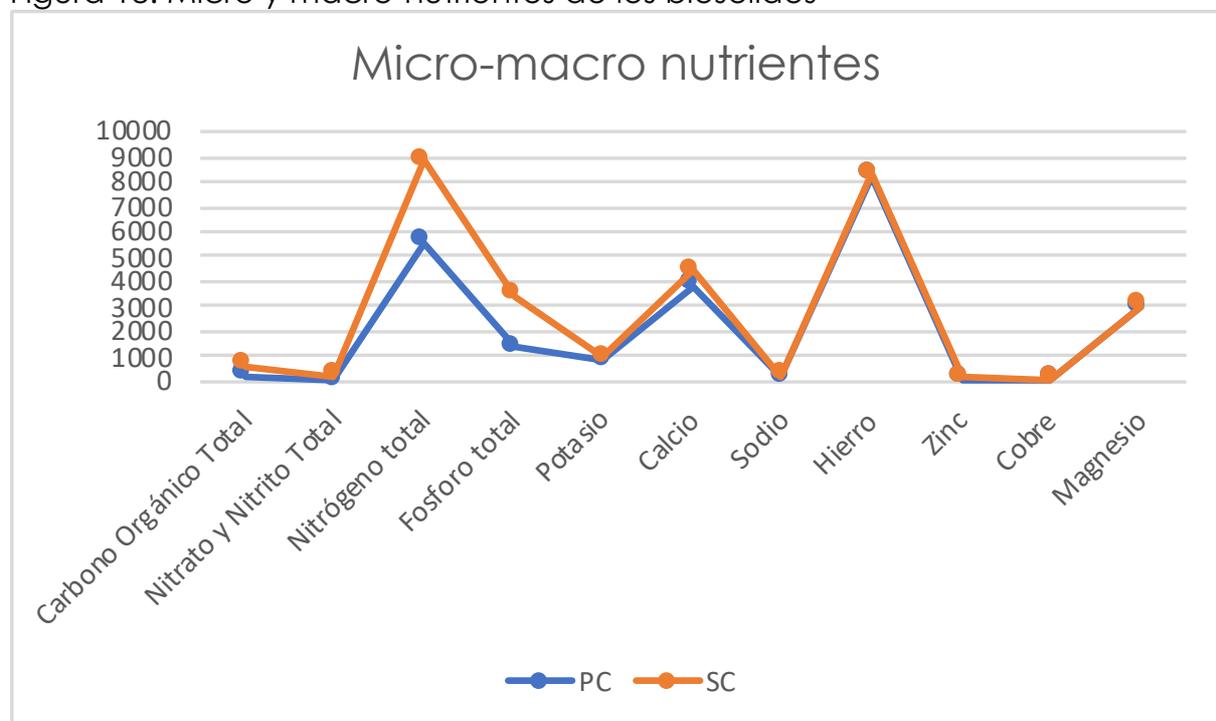
Tabla 11. Valores correspondientes a los macro y micro-nutrientes contenidos en los biosólidos utilizados como fertilizantes en el cultivo del maíz

Parámetro	Unidad	Valor	
		PC	SC
Carbono Orgánico Total (COT)	Mg/Kg	226	596
Nitrato y Nitrito Total (n+n-N)	Mg/Kg	5.15	225
Nitrógeno total (N)	Mg/Kg	5565	8844
Fosforo total (P)	Mg/Kg	1313	3444
Potasio (K)	Mg/Kg	798	977
Calcio (Ca)	Mg/Kg	3805	4438
Sodio (Na)	Mg/Kg	152	208
Hierro (Fe)	Mg/Kg	8259	8297
Zinc (Zn)	Mg/Kg	102	131
Cobre (Cu)	Mg/Kg	40.1	87.01
Magnesio (Mg)	Mg/Kg	2941	3000

Fuente: elaboración propia. PC: valor del parámetro del suelo en muestra analizada para la primera cosecha de maíz; SC: valor del parámetro del suelo en muestra analizada para la segunda cosecha de maíz.

En la figura 18 se muestran gráficamente los datos de la tabla anterior. De esta forma se observa una secuencia de abundancia de Fe > N > Ca > Mg > P > K > COT > Na > Zn > Cu > n+n-N en el primer análisis, y de N > Fe > Ca > P > Mg > K > COT > n+n-N > Na > Zn > Cu para el segundo análisis.

Figura 18. Micro y macro-nutrientes de los biosólidos



Fuente: elaboración propia.

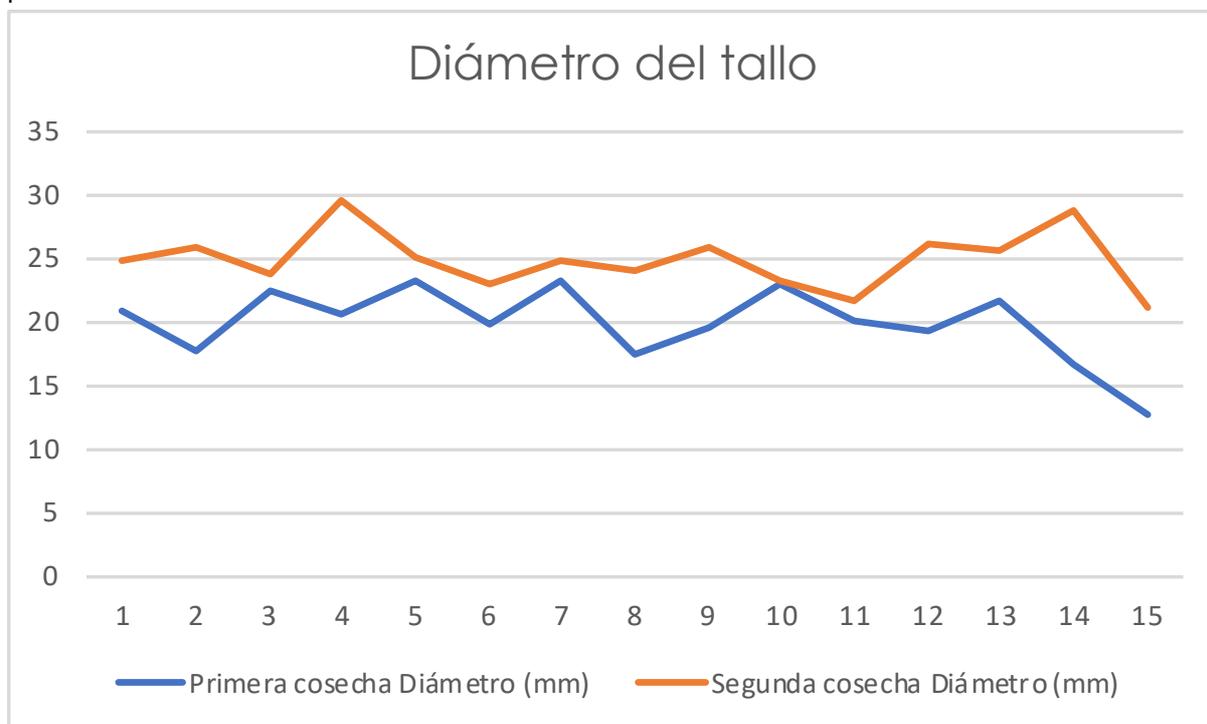
4.3. Análisis del cultivo de maíz

En este subapartado se presentan los datos del análisis del cultivo, a partir de los muestreos realizados en cada bloque y para cada cosecha.

4.3.1. Diámetro del tallo de las plantas

La figura 19 muestra el diámetro del tallo de las plantas del bloque I para la primera y segunda cosecha. La medición de la primera cosecha se realizó el 28/01/2018, a los 30 días de la nacencia. El diámetro promedio de la muestra de la primera cosecha fue de 19.95 mm. La medición de la segunda cosecha fue realizada el 9/11/2018, a los 30 días de la nacencia. El diámetro promedio de la muestra de la segunda cosecha fue de 24.96 mm.

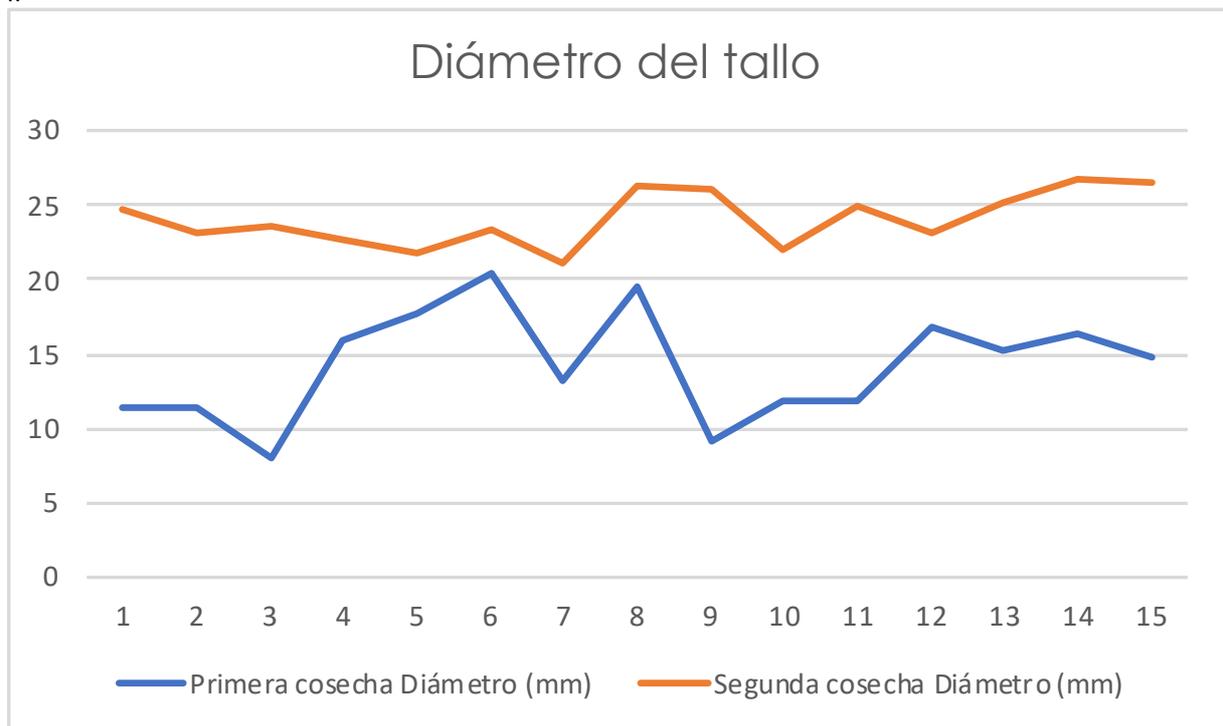
Figura 19. Diámetro del tallo de la planta en la muestra del cultivo del bloque I



Fuente: elaboración propia.

En la figura 20 se muestra el diámetro del tallo de las plantas del bloque II para la primera y segunda cosecha. La medición de la primera cosecha se realizó el 28/01/2018, a los 30 días de la nacencia. El diámetro promedio de la muestra de la primera cosecha fue de 14.23 mm. La medición de la segunda cosecha fue realizada el 9/11/2018, a los 30 días de la nacencia. El diámetro promedio de la muestra de la segunda cosecha fue de 24.09 mm.

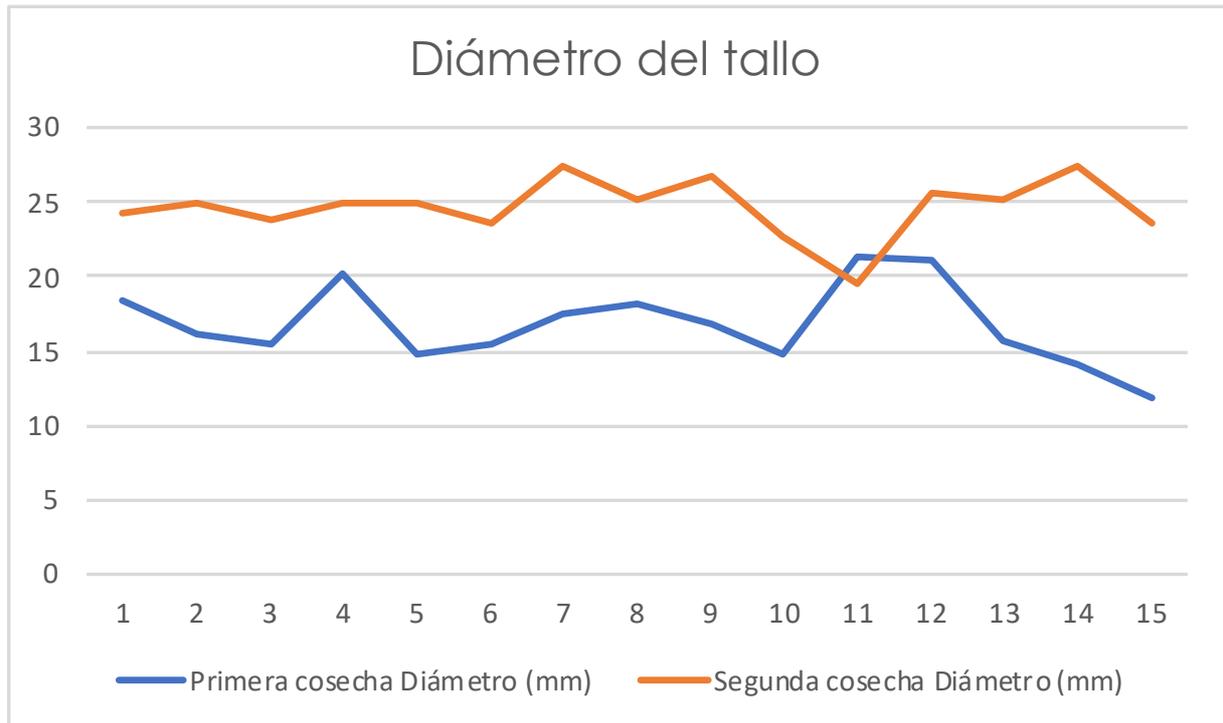
Figura 20. Diámetro del tallo de la planta en la muestra del cultivo del bloque II



Fuente: elaboración propia.

La figura 21 muestra el diámetro del tallo de las plantas del bloque III para la primera y segunda cosecha. La medición de la primera cosecha se realizó el 28/01/2018, a los 30 días de la nacencia. El diámetro promedio de la muestra de la primera cosecha fue de 16.79 mm. La medición de la segunda cosecha fue realizada el 9/11/2018, a los 30 días de la nacencia. El diámetro promedio de la muestra de la segunda cosecha fue de 24.66 mm.

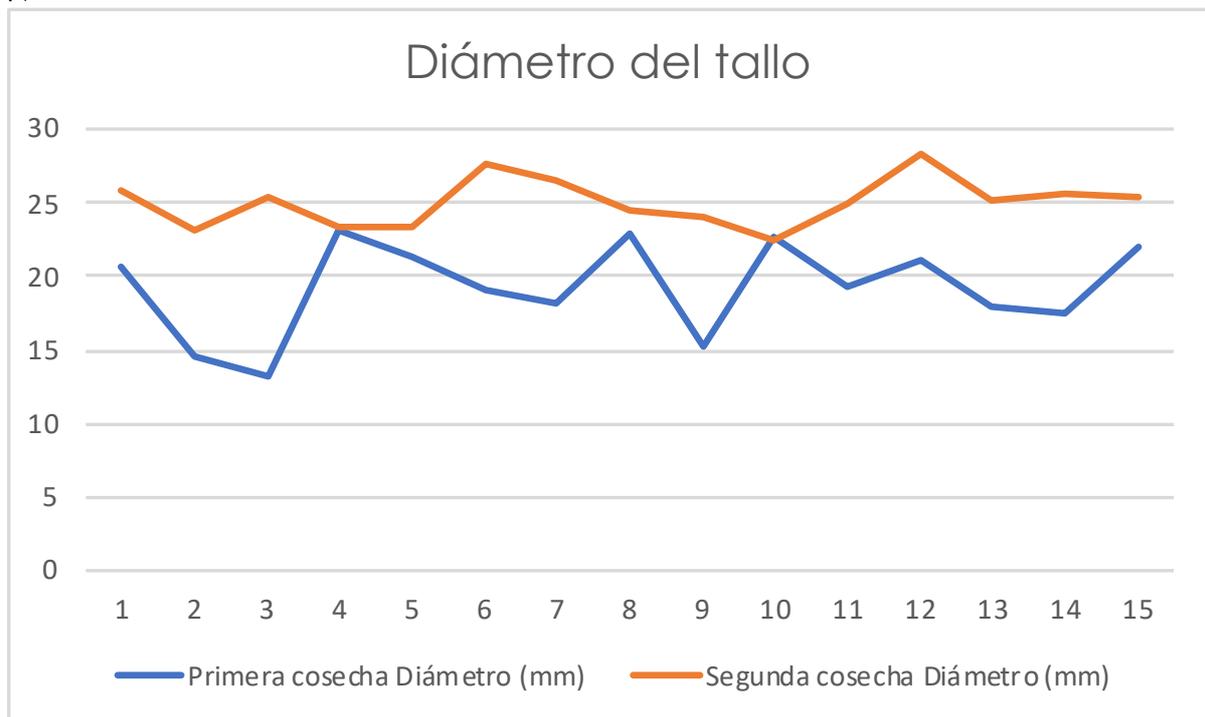
Figura 21. Diámetro del tallo de la planta en la muestra del cultivo del bloque III



Fuente: elaboración propia.

En la figura 22 se muestra el diámetro del tallo de las plantas del bloque IV para la primera y segunda cosecha. La medición de la primera cosecha se realizó el 28/01/2018, a los 30 días de la nacencia. El diámetro promedio de la muestra de la primera cosecha fue de 19.26 mm. La medición de la segunda cosecha fue realizada el 9/11/2018, a los 30 días de la nacencia. El diámetro promedio de la muestra de la segunda cosecha fue de 25.04 mm.

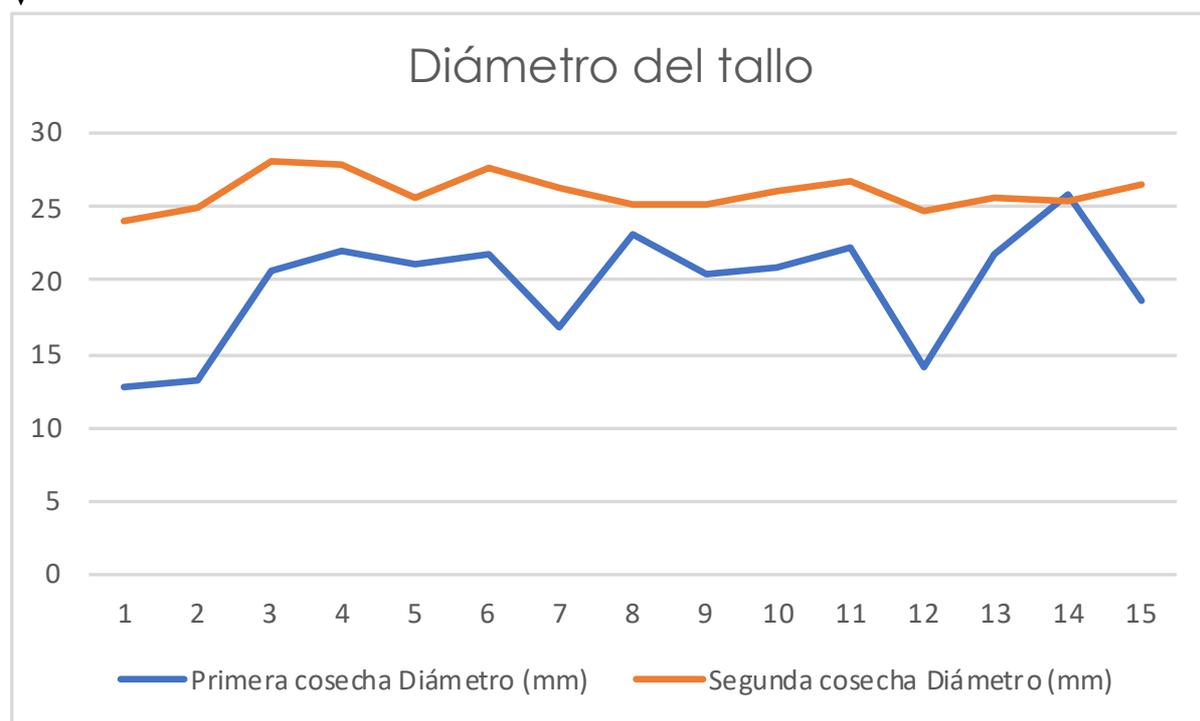
Figura 22. Diámetro del tallo de la planta en la muestra del cultivo del bloque IV



Fuente: elaboración propia.

La figura 23 muestra el diámetro del tallo de las plantas del bloque V para la primera y segunda cosecha. La medición de la primera cosecha se realizó el 28/01/2018, a los 30 días de la nacencia. El diámetro promedio de la muestra de la primera cosecha fue de 19.69 mm. La medición de la segunda cosecha fue realizada el 9/11/2018, a los 30 días de la nacencia. El diámetro promedio de la muestra de la segunda cosecha fue de 26.01 mm.

Figura 23. Diámetro del tallo de la planta en la muestra del cultivo del bloque V



Fuente: elaboración propia.

En la tabla 12, se observa el diámetro promedio del tallo de las plantas de la muestra de cada bloque. Como se puede observar, el valor promedio de los diámetros del tallo de las plantas de los bloques I, IV y V presentan un valor mayor que el de los bloques II y III. De igual manera, los diámetros de los tallos de las plantas de la segunda cosecha presentan valores mayores que los correspondientes a los bloques de la primera cosecha. Esta situación podría ser atribuible a las mejores condiciones climáticas que tuvo la segunda cosecha con respecto a la primera.

Tabla 12. Diámetro promedio del tallo de las plantas de la muestra de cada bloque (en mm)

Bloque	Primera cosecha					Segunda cosecha				
	Dp	Dm	DDm (-)	DM	DDM (+)	Dp	Dm	DDm (-)	DM	DDM (+)
I	19.95	12.87	35.0	23.24	16.8	24.96	21.15	15.3	29.56	18.4
II	14.23	8.05	43.2	20.36	43.1	24.09	21.15	12.2	26.80	11.2
III	16.79	11.76	29.9	21.25	26.6	24.66	19.60	20.5	27.53	11.6
IV	19.26	13.20	31.5	23.23	20.6	25.04	22.37	10.7	28.24	12.8
V	19.69	12.83	34.8	25.83	31.2	26.01	24.09	7.4	28.03	7.8

Fuente: elaboración propia. Dp: diámetro promedio del tallo de la planta de la muestra; Dm: diámetro menor del tallo de la planta de la muestra; DM: diámetro mayor del tallo de la planta de la muestra; DDm (-): desviación del diámetro menor de las planta de la muestra con respecto al diámetro promedio; DDM (+): desviación del diámetro mayor de las planta de la muestra con respecto al diámetro promedio.

La tabla 13 muestra un análisis ANOVA del diámetro del tallo de las plantas de maíz para la primera cosecha. Se aprecia la existencia de diferencias significativas entre el diámetro y el tratamiento utilizado en cada bloque.

Tabla 13. Análisis ANOVA para la variable diámetro del tallo según bloque, para la primera cosecha

	SC	GI	MC	F	p-valor
Entre grupos	357,869	4	89,467	8,430	0,000
Dentro de grupos	742,925	70	10,613		
Total	1100,794	74			

Fuente: elaboración propia. SC: suma de cuadrados; MC: media cuadrática.

En la tabla 14 se muestra un análisis ANOVA del diámetro del tallo de las plantas de maíz para la segunda cosecha. En este caso, no se aprecia la existencia de diferencias entre el diámetro y el tratamiento utilizado en cada bloque.

Tabla 14. Análisis ANOVA para la variable diámetro del tallo según bloque, para la segunda cosecha.

	SC	GI	MC	F	p-valor
Entre grupos	29,312	4	7,328	2,212	0,077
Dentro de grupos	231,948	70	3,314		
Total	261,260	74			

Fuente: elaboración propia. SC: suma de cuadrados; MC: media cuadrática.

4.3.2. Altura de las plantas

La tabla 15 muestra la altura promedio de las plantas de la muestra del cultivo a 30 días de la nacencia. Se observa que los bloques III y V muestran los mejores resultados. El bloque III presentó una altura promedio de 208.3 mm para la primera cosecha y una altura promedio de 173.3 mm para la segunda cosecha. El bloque V mostró una altura promedio de 178.5 mm para la primera cosecha y una altura promedio de 201.9 mm para la segunda cosecha. A través de un análisis ANOVA de la altura de las plantas de maíz para la primera cosecha, se evidencian diferencias significativas entre la altura y el tratamiento utilizado en cada bloque ($F = 7628$, $p\text{-valor} = 0,000$). Para el caso

de la segunda cosecha, también se encontraron evidencias significativas ($F = 1750$, $p\text{-valor} = 0,000$).

Tabla 15. Altura promedio de las plantas de la muestra del cultivo a 30 días de la nacencia (en mm)

Bloque	Primera cosecha					Segunda cosecha				
	Ap	Am	DAm (%) (-)	AM	DAM (%) (+)	Ap	Am	DAm (%) (-)	AM	DAM (%) (+)
I	190.9	143	25.1	252	32.0	159.0	125	21.4	190	19.5
II	181.9	153	15.9	205	10.6	152.9	90	41.1	196	28.2
III	208.3	151	27.5	235	12.8	175.3	115	34.4	230	31.2
IV	160.7	124	22.8	181	12.6	146.9	110*	25.1	196	33.4
V	178.5	142	20.4	216	21.0	201.9	124	38.6	240	18.9

Fuente: elaboración propia. Ap: Altura promedio; Am: altura menor; AM: altura mayor; DAm: desviación altura menor (en %); DAM: desviación altura mayor (en %); *Una de las 15 plantas de la muestra seleccionada tuvo mucho menor altura que esta, sin embargo, se eligió este valor correspondiente a otra planta por ser más representativo.

4.3.3. Longitud de la mazorca

En la tabla 16 se presenta la longitud de la mazorca de maíz para la muestra de la primera cosecha. Se evidencia que la longitud de las mazorcas del bloque V es mayor que la correspondiente a los restantes bloques, siendo un 11.2 % mayor que la del bloque I (testigo) y un 6.1% mayor que la del bloque II (al que se aplicó fertilización química). Por otro lado, la longitud de las mazorcas cosechadas en los bloques III y IV resultó menor que la correspondiente al bloque I.

Tabla 16. Longitud de mazorca de maíz en la muestra de la primera cosecha (en cm)

Número de mazorca	Bloque I	Bloque II	Bloque III	Bloque IV	Bloque V
1	15.0	17.2	14.2	11.3	16.5
2	16.8	16.2	16.9	12.9	17.5
3	12.9	14.7	14.2	13.9	18.0
4	13.5	14.5	15.4	14.2	16.2
5	15.5	14.3	13.8	12.3	15.2
6	16.2	15.4	12.7	12.9	15.8
7	13.5	13.5	13.9	12.8	12.6
8	13.5	11.3	13.7	11.9	14.3
9	13.2	14.1	14.1	12.2	13.4
10	16.2	13.8	11.6	14.0	14.7
11	11.0	12.9	10.2	11.5	15.2
12	13.8	10.9	10.4	8.5	13.3
13	14.2	10.5	9.8	10.8	10.8
14	11.2	13.2	10.2	10.0	13.9
15	12.2	10.5	9.1	13.2	9.1
16	8.5	9.8	9.7	11.5	10.3
17	12.5	9.5	10.8	10.2	9.2
18	9.7	-	8.2	8.2	-
19	9.6	-	-	10.2	-
20	7.5	-	-	8.2	-
21	9.9	-	-	10.1	-
22	8.3	-	-	9.9	-
-	-	-	-	5.1	-
Total	274.7	222.3	218.9	255.8	236.0
Promedio	12.5	13.1	12.2	11.1	13.9
DP	-	4.8 (+)	2.4 (-)	11.2 (-)	11.2 (+)

Fuente: elaboración propia. DP: desviación porcentual de la longitud promedio de mazorca con relación a la del bloque I (testigo).

La tabla 17 muestra que no existieron diferencias significativas entre la longitud de la mazorca de maíz de la primera cosecha obtenidas en el tratamiento realizado en cada bloque.

Tabla 17. Análisis ANOVA para la variable longitud de la mazorca de maíz según bloque, para la primera cosecha.

	SC	GI	MC	F	p-valor
Entre grupos	83,659	4	20,915	3,372	0,013
Dentro de grupos	570,703	92	6,203		
Total	654,362	96			

Fuente: elaboración propia. SC: suma de cuadrados; MC: media cuadrática.

La tabla 18 evidencia una longitud de las mazorcas de la muestra del bloque V mayor que la correspondiente a los restantes bloques.

Tabla 18. Longitud de mazorca de maíz en la muestra de la segunda cosecha (en cm)

Número de mazorca	Bloque I	Bloque II	Bloque III	Bloque IV	Bloque V
1	13.4	13.2	17.1	14.2	15.1
2	15.3	14.1	17.3	16.4	17.2
3	18.4	15.1	12.3	15.1	16.1
4	17.3	13.4	12.2	17.1	17.1
5	14.3	16.1	18.1	16.2	13.4
6	9.3	12.3	15.1	14.3	17.2
7	9.1	14.1	15.3	10.3	18.1
8	13.1	17.1	15.1	12.4	17.3
9	15.2	4.3	13.3	14.1	16.0
10	12.4	14.2	13.4	13.4	7.4
11	13.1	13.4	14.1	10.1	10.1
12	12.3	16.1	12.1	8.4	13.4
13	14.3	10.4	12.3	14.1	9.3
14	9.4	7.1	10.1	9.1	9.2
15	13.3	15.3	9.4	8.1	14.1
16	9.1	11.1		9.2	15.1
17	9.3			6.1	12.1
18				9.4	
Longitud total	218.6	207.3	207.2	218.0	238.2
Promedio	12.9	12.9	13.8	12.1	14.0
DP	-	0	7.0 (+)	6.6 (-)	8.5 (+)

Fuente: elaboración propia. DP: desviación porcentual de la longitud de mazorca con relación al bloque I (testigo). (+): significa que el valor promedio es mayor que el del bloque I (testigo);(-): significa que el valor promedio es menor que el del bloque I (testigo).

Aunque las mazorcas del bloque V tienen mayor longitud al resto de los bloques, la tabla 19 muestra que no existieron diferencias significativas entre

la longitud de la mazorca de maíz de la segunda cosecha y el tratamiento realizado en cada bloque.

Tabla 19. Análisis ANOVA para la variable longitud de la mazorca de maíz según bloque, para la segunda cosecha

	SC	GI	MC	F	p-valor
Entre grupos	40,638	4	10,160	1,046	0,389
Dentro de grupos	757,553	78	9,712		
Total	798,192	82			

Fuente: elaboración propia. SC: suma de cuadrados; MC: media cuadrática.

4.3.4. Diámetro de las mazorcas

La tabla 20 evidencia un diámetro (grosor) de las mazorcas del bloque V mucho mayor que el de los restantes bloques, siendo un 9.2% mayor que las mazorcas del bloque I (testigo) y un 3.8% mayor que la muestra de mazorcas del bloque II (al que se aplicó fertilización química). El grosor de las mazorcas cosechadas en los bloques III y IV resultó también mayor (1.1 % y 2.9 %) que el correspondiente al bloque I.

Aunque el bloque V las mazorcas presentaron un mayor diámetro, la tabla 21 indica que no existieron diferencias significativas entre el diámetro de las mazorcas de maíz de la primera cosecha y el tratamiento realizado en cada uno de los diferentes bloques.

Tabla 20. Diámetro de las mazorcas de maíz correspondientes a la muestra de la primera cosecha (en mm)

Número de mazorca	Bloque I	Bloque II	Bloque III	Bloque IV	Bloque V
1	53.15	53.63	53.19	45.92	53.93
2	49.41	52.85	51.87	48.10	55.55
3	47.47	54.69	55.52	50.21	51.92
4	41.95	48.65	50.39	47.31	51.89
5	49.34	46.65	47.58	44.55	55.77
6	46.02	47.55	50.29	52.37	50.30
7	50.08	54.03	41.87	50.32	55.58
8	55.41	52.70	48.06	45.70	46.13
9	45.06	48.60	45.01	45.92	49.49
10	46.78	47.74	42.27	40.54	51.19
11	44.84	43.90	46.50	40.91	52.80
12	44.99	45.81	45.25	46.24	47.53
13	45.50	52.01	46.31	44.59	43.42
14	50.01	40.64	40.86	44.05	38.58

15	49.88	35.18	42.29	41.50	43.68
16	35.92	36.60	36.01	39.93	37.08
17	39.96	36.68	36.01	49.08	42.82
18	39.33	-	32.58	48.49	-
19	33.39	-	-	44.16	-
20	39.37	-	-	38.66	-
21	38.86	-	-	34.95	-
22	35.32	-	-	22.72	-
23	-	-	-	28.73	-
Total	982.04	797.91	811.86	994.95	827.66
Promedio	44.6	46.9	45.1	43.3	48.7
DP	-	5.1 (+)	1.1 (+)	2.9 (-)	9.2 (+)

Fuente: elaboración propia. DP: desviación porcentual del diámetro de la mazorca con relación al bloque I (testigo). * El diámetro fue medido en la parte céntrica longitudinal de la mazorca.

Tabla 21. Análisis ANOVA para la variable diámetro de las mazorcas de maíz correspondientes a la muestra de la primera cosecha según bloque

	SC	GI	MC	F	p-valor
Entre grupos	342,300	4	85,575	2,142	0,082
Dentro de grupos	3676,299	92	39,960		
Total	4018,599	96			

Fuente: elaboración propia. SC: suma de cuadrados; MC: media cuadrática.

La tabla 22 muestra un diámetro (grosor) promedio de las mazorcas de la muestra de los bloques IV y V mayor que el diámetro de los restantes bloques.

Tabla 22. Diámetro de mazorca de maíz en la muestra de la segunda cosecha (en mm)

Número de mazorca	Bloque I	Bloque II	Bloque III	Bloque IV	Bloque V
1	49.27	54.26	50.70	56.37	57.24
2	47.54	54.72	52.91	57.60	56.67
3	56.25	55.04	46.81	52.66	56.01
4	52.33	50.15	42.99	51.14	33.27
5	52.77	45.85	58.12	52.97	52.06
6	53.65	45.67	49.39	49.04	55.18
7	52.86	50.41	43.10	47.63	56.56
8	40.57	55.66	50.17	51.72	50.48
9	50.95	33.64	48.31	57.60	53.02
10	49.90	58.32	19.95	43.50	45.56
11	41.64	45.30	38.48	51.87	49.63
12	43.58	54.24	37.93	46.22	53.66

13	50.74	40.86	48.08	56.21	51.33
14	44.12	55.30	41.82	57.25	45.50
15	49.55	43.21	41.85	56.31	42.37
16	42.95	38.17	-	48.64	45.07
17	34.35	-	-	40.33	39.76
18	-	-	-	46.75	-
Total	813.0	780.8	670.6	923.8	843.4
Promedio	47.8	48.8	44.7	51.3	49.6
DP	-	2.1 (+)	6.5 (-)	7.3 (+)	3.8 (+)

Fuente: elaboración propia. DP: desviación porcentual del promedio de la longitud de la mazorca de maíz con relación a la del bloque I (testigo); (+): significa que el valor promedio de la longitud de la mazorca es mayor que la del bloque I (testigo); (-): significa que el valor promedio de la longitud de la mazorca es menor que la del bloque I (testigo).

Aunque los bloques IV y V presentaron mazorcas con mayores diámetros, la tabla 23 indica que no existieron diferencias significativas entre el diámetro de las mazorcas de maíz de la segunda cosecha y el tratamiento realizado en cada bloque.

Tabla 23. Análisis ANOVA para la variable diámetro de las mazorcas de maíz correspondientes a la muestra de la segunda cosecha según bloque

	SC	GI	MC	F	p-valor
Entre grupos	388,878	4	97,220	2,116	0,087
Dentro de grupos	3584,251	78	45,952		
Total	3973,130	82			

Fuente: elaboración propia. SC: suma de cuadrados; MC: media cuadrática.

4.3.5. Cantidad de hileras por mazorca

La tabla 24 indica que los bloques III y V tuvieron una mayor cantidad de hileras por mazorca. El bloque III presentó un incremento del 9.5% respecto al bloque I, y el bloque V mostró un aumento del 5.4% respecto al bloque I. De igual manera, el bloque II presenta un incremento de un 2.7% mayor que la del bloque I. Tomando en consideración la observación realizada al pie de la tabla, también el bloque IV presenta un valor promedio mayor (1.4%) de la cantidad de hileras por mazorca que el bloque I.

Tabla 24. Cantidad de hileras por mazorca de maíz en la muestra de la primera cosecha.

Número de mazorca	Bloque I	Bloque II	Bloque III	Bloque IV	Bloque V
1	18	17	16	14	17
2	14	16	16	20	18
3	16	16	18	14	18
4	16	16	17	16	14
5	16	14	14	16	16
6	14	14	18	17	14
7	18	16	18	14	14
8	14	14	16	13	16
9	18	16	16	17	14
10	14	16	16	14	16
11	16	14	15	12	14
12	16	12	16	16	16
13	14	16	14	16	15
14	16	15	15	14	14
15	15	16	13	16	17
16	11	14	18	12	18
17	14	14	18	15	12
18	14	-	16	17	-
9	7	-	-	16	-
20	14	-	-	12	-
21	15	-	-	12	-
22	13	-	-	4	-
23	-	-	-	4	-
Total	323	256	290	321	263
Promedio	14.7	15.1	16.1	14.1*	15.5
DP	-	2.7 (+)	9.5 (+)	4.1 (-) *	5.4 (+)

Fuente: elaboración propia. *Si se obvian las mazorcas números 22 y 23, las cuales no son representativas de las restantes de la muestra, el promedio de hileras/mazorca para este bloque sería de 14.9 y la DP de 1.4 % (+).

Aunque los bloques III y V tuvieron mejores promedios, la tabla 25 muestra que no existieron diferencias significativas entre la cantidad de hileras por mazorca de maíz de la primera cosecha y el tratamiento realizado en cada bloque.

Tabla 25. Análisis ANOVA para la variable cantidad de hileras por mazorca de maíz correspondientes a la muestra de la primera cosecha según bloque

	SC	GI	MC	F	p-valor
Entre grupos	53,275	4	13,319	2,250	0,070
Dentro de grupos	544,583	92	5,920		
Total	597,959	96			

Fuente: elaboración propia. SC: suma de cuadrados; MC: media cuadrática.

La tabla 26 muestra que los bloques I, III y V presentan una mayor cantidad de hileras por mazorca para la segunda cosecha.

Tabla 26. Cantidad de hileras por mazorca de maíz en la muestra de la segunda cosecha

Número de mazorca	Bloque I	Bloque II	Bloque III	Bloque IV	Bloque V
1	16	16	16	19	16
2	18	16	16	16	18
3	19	18	14	16	20
4	17	16	14	18	16
5	18	14	18	14	16
6	19	16	18	14	16
7	15	16	18	16	17
8	16	17	18	14	18
9	16	8	14	16	18
10	18	20	17	14	14
11	18	16	14	16	14
12	14	14	14	14	19
13	15	16	16	16	14
14	17	18	16	18	14
15	18	16	18	18	18
16	14	10	-	13	14
17	16	-	-	10	14
18	-	-	-	14	-
Total	284	247	241	276	276
Promedio	16.7	15.4	16.1	15.3	16.2
DP	-	7.8 (-)	3.4 (-)	8.4 (-)	3.0 (-)

Fuente: elaboración propia. DP: desviación porcentual del promedio de la cantidad de hileras por mazorca de maíz con relación a la del bloque I (testigo).

La tabla 27 indica que no existieron diferencias significativas entre cantidad de hileras por mazorca de maíz de la segunda cosecha y el tratamiento realizado en cada bloque.

Tabla 27. Análisis ANOVA para la variable cantidad de hileras por mazorca de maíz correspondientes a la muestra de la segunda cosecha según bloque

	SC	GI	MC	F	p-valor
Entre grupos	22,348	4	5,487	1,219	0,310
Dentro de grupos	357,459	78	4,583		
Total	379,807	82			

Fuente: elaboración propia. SC: suma de cuadrados; MC: media cuadrática.

4.3.6. Granos por hilera de mazorca

En la tabla 28 se evidencia un valor promedio de granos por hilera de las mazorcas de la muestra del bloque V mucho mayor que la de los restantes bloques, siendo la diferencia mucho más significativa con respecto a las mazorcas de la muestra del bloque I (14.3 %). De igual manera la cantidad de granos por hilera de las mazorcas de la muestra de los bloques II y III presentan un incremento de un 9.0 % con respecto a las mazorcas del bloque I. En cambio, el bloque IV presenta una menor cantidad de granos por hilera en las mazorcas analizadas (un 6.4% menor) respecto a la muestra del bloque I.

Tabla 28. Cantidad de granos por hilera en las mazorcas de maíz de la muestra de la primera cosecha

Número de mazorca	Bloque I	Bloque II	Bloque III	Bloque IV	Bloque V
1	30	39	34	25	34
2	37	30	32	26	35
3	30	32	30	31	34
4	32	34	34	35	33
5	38	33	37	35	29
6	40	38	32	27	35
7	31	26	35	31	26
8	24	28	23	20	38
9	31	31	33	29	32
10	30	29	32	37	27
11	27	28	19	57	33
12	28	27	24	20	24
13	32	20	22	24	27
14	19	30	25	17	40
15	27	26	24	29	17
16	12	21	35	24	29
17	35	21	35	21	24
18	18	-	16	14	-
19	17	-	-	9	-
20	16	-	-	23	-

21	17	-	-	17	-
22	15	-	-	17	-
23		-	-	4	-
Total	586	493	522	572	517
Promedio	26.6	29.0	29.0	24.9	30.4
DP	-	9.0 (+)	9.0 (+)	6.4 (-)	14.3 (+)

Fuente: elaboración propia. DP: desviación porcentual de la cantidad de granos por mazorca con relación al bloque I (testigo).

Aunque la cantidad de granos por hilera es mayor en el bloque V, la tabla 29 indica que no existieron diferencias significativas entre la cantidad de granos por hilera en las mazorcas de maíz de la muestra de la primera cosecha y el tratamiento realizado en cada bloque.

Tabla 29. Análisis ANOVA para la variable cantidad de granos por hilera en las mazorcas de maíz correspondientes a la muestra de la primera cosecha según bloque

	SC	GI	MC	F	p-valor
Entre grupos	393,214	4	98,303	1,597	0,182
Dentro de grupos	5661,817	92	61,541		
Total	6055,031	96			

Fuente: elaboración propia. SC: suma de cuadrados; MC: media cuadrática.

La tabla 30 muestra que los bloques III y V poseen valores promedios más altos de granos por hilera en las mazorcas.

Tabla 30. Cantidad de granos por hilera de mazorca de maíz en la muestra de la segunda cosecha

Número de mazorca	Bloque I	Bloque II	Bloque III	Bloque IV	Bloque V
1	32	21	22	33	33
2	34	24	34	33	35
3	36	36	24	32	33
4	32	30	26	35	30
5	30	27	34	33	34
6	22	24	32	34	35
7	16	25	36	24	38
8	28	30	32	22	40
9	26	8	27	24	32
10	22	27	27	24	13
11	25	26	32	19	23
12	25	30	24	13	28
13	24	20	23	25	14
14	18	7	22	14	17

15	25	32	22	7	24
16	18	24	-	15	26
17	14	-	-	9	20
18	-	-	-	13	-
Total	427	391	417	409	475
Promedio	25	24	28	23	28
DP	-	4.0 (-)	12.0 (+)	8.0 (-)	12.0 (+)

Fuente: elaboración propia. DP: desviación porcentual de la cantidad de granos por hilera de mazorca de maíz con relación a los del bloque I (testigo).

En la tabla 31 se muestra que no existieron diferencias significativas entre la cantidad de granos por hilera en las mazorcas de maíz de la muestra de la segunda cosecha y el tratamiento realizado en cada bloque.

Tabla 31. Análisis ANOVA para la variable cantidad de granos por hilera en las mazorcas de maíz correspondientes a la muestra de la segunda cosecha según bloque

	SC	GI	MC	F	p-valor
Entre grupos	340,020	4	85,005	1,480	0,216
Dentro de grupos	4478,654	78	57,419		
Total	4818,675	82			

Fuente: elaboración propia. SC: suma de cuadrados; MC: media cuadrática.

4.3.7. Granos por mazorca

La tabla 32 presenta un resumen del promedio de hileras por mazorca y el promedio de granos por hilera. También, indica la cantidad promedio de granos por mazorca para cada bloque. En este sentido, destacan los bloques III y V, con una desviación porcentual de un 19.4 % y un 20.5 % mayor que la del bloque I (testigo), respectivamente. Además, dicha desviación es significativamente mayor que la de los bloques II y IV.

Tabla 32. Cantidad promedio de granos por mazorca de maíz en la muestra de la primera cosecha

Bloque	Promedio de hileras por mazorca	Promedio de granos por hilera	Total promedio de granos por mazorca	DP
I	14.7	26.6	391.0	-
II	15.1	29.0	437.9	12 (+)
III	16.1	29.0	466.9	19.4 (+)
IV	14.1	24.9	351.1	10.2 (-)
V	15.5	30.4	471.2	20.5 (+)

Fuente: elaboración propia. DP: desviación porcentual de la cantidad promedio de granos por mazorca con relación a la del bloque I (testigo).

En la tabla 33 se muestra que la cantidad promedio de granos por mazorca correspondiente a los bloques III y V es mayor que la de los bloques I, III y IV. Así, los bloques III y V tienen una desviación porcentual de 8.0 % y 8.6 % mayor que la del bloque I (testigo), respectivamente; resultando dicha desviación aun mayor para los restantes bloques (bloques II y IV).

Tabla 33. Cantidad promedio de granos por mazorca de maíz en la muestra de la segunda cosecha

Bloque	Promedio de hileras mazorca	de por	Promedio de granos hilera	de por	Total promedio de granos por mazorca	DP
I	16.7		25		417.5	-
II	15.4		24		369.6	11.5 (-)
III	16.1		28		450.8	8.0 (+)
IV	15.3		23		351.9	15.7 (-)
V	16.2		28		453.6	8.6 (+)

Fuente: elaboración propia. DP: desviación porcentual de la cantidad promedio de granos por mazorca con relación a la del bloque I (testigo); (+): significa que el valor promedio de la cantidad de granos por mazorca es mayor que la del bloque I (testigo); (-): significa que el valor promedio de la cantidad de granos por mazorca es menor que la del bloque I (testigo).

Se encontraron diferencias significativas entre la cantidad de granos de maíz por mazorca y el tratamiento realizado en cada bloque, tanto para la primera cosecha (F = 1412, p-valor = 0,000) como para la segunda (F = 1719, p-valor = 0,000).

Con la finalidad de facilitar el proceso de discusión y de la formulación de las conclusiones, en la tabla 34 se presenta un resumen de los aspectos más relevantes del rendimiento de cada cosecha. Los porcentajes están referidos al rendimiento de la muestra correspondiente al bloque I (testigo). El signo (+) colocado a la derecha de cada valor porcentual significa que el bloque tuvo un valor mayor respecto al bloque I. Por su parte, un signo (-) significa que el bloque tuvo un valor menor con relación al dato del bloque I.

Tabla 34. Resumen del rendimiento promedio de las mazorcas en cada bloque y cosecha

Bloque	Primera cosecha (valores en %)					Segunda cosecha (valores en %)				
	Lm	Dm	H/m	G/h	G/m	Lm	Dm	H/m	G/h	G/m
I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
II	4.8 (+)	5.1 (+)	2.7 (+)	9.0 (+)	12 (+)	0	2.1 (+)	7.8 (-)	4.0 (-)	11.5 (-)
III	2.4 (-)	1.1 (+)	9.5 (+)	9.0 (+)	19.4 (+)	7.0 (+)	6.5 (-)	3.4 (-)	12.0 (+)	8.0 (+)

IV	11.2 (-)	2.9 (-)	4.1 (-) *	6.4 (-)	10.2 (-)	6.6 (-)	7.3 (+)	8.4 (-)	8.0 (-)	15.7 (-)
V	11.2 (+)	9.2 (+)	5.4 (+)	14.3 (+)	20.5 (+)	8.5 (+)	3.8 (+)	3.0 (-)	12.0 (+)	8.6 (+)

Fuente: elaboración propia. Lm: longitud promedio de las mazorcas de las plantas de la muestra; Dm: diámetro promedio de las mazorcas de la muestra; H/m: cantidad promedio de hileras por mazorca de las plantas de la muestra; G/h: cantidad promedio de granos por hilera contenidos en las mazorcas de la muestra; G/m: cantidad promedio de granos contenidos en las mazorcas de la muestra.

4.4. Discusión de los resultados

La discusión de los resultados se presenta en tres subapartados: suelos, biosólidos y cultivos de maíz.

4.4.1. Suelos

Los suelos de la Finca Experimental utilizados para el cultivo no eran de óptima calidad, si bien, se encontraron en ellos algunos nutrientes. El pH del suelo era ligeramente alcalino, con unos valores óptimos para el desarrollo agrícola (Garrido, 1993), incluido el cultivo de maíz (Andrades y Martínez, 2014). La MO indica la cantidad de restos orgánicos que se encuentran alterados y que, por consiguiente, pueden mejorar el contenido de nutrientes del suelo (Garrido, 1993). En este sentido, los suelos utilizados para la experimentación tenían un porcentaje muy alto de MO (Garrido, 1993; Andrades y Martínez, 2014), lo que favorece el desarrollo de una buena estructura de suelo, la protección frente a la erosión, el mejoramiento de la aireación y la capacidad de retención de agua (Andrades y Martínez, 2014).

El suelo de este estudio poseía niveles de P normales en el análisis previo a la primera cosecha, los cuales mejoraron en el segundo análisis, obteniéndose valores altos de P. La diferencia puede deberse a que, en el segundo análisis del suelo, el mismo contenía nutrientes provenientes de los biosólidos utilizados en la primera cosecha. Los valores de P contenidos en el suelo podrían haber incentivado el desarrollo de las raíces y estimular el crecimiento del cultivo de maíz (Andrades y Martínez, 2014). Los valores de K son altos y, por tanto, óptimos para el cultivo (Martínez, 2003). Los niveles de Mg, Na, Ca, S y Fe son adecuados para desarrollar cultivos. Los valores de Zn son adecuados para el suelo, debido a que están muy por debajo de los valores máximos permitidos (Pérez, 2016).

Los valores encontrados de Mn son, también, adecuados para el suelo (González-Flores *et al.*, 2017). La cantidad de Cu registrada en los análisis de suelo es muy baja y adecuada para el suelo de cultivo (Pérez, 2016). Las

concentraciones de B localizadas en los suelos son bajas, pudiéndose deberse esto a la poca aplicación de fertilizantes y a la poca utilización del agua para regadío (Martínez, 2003), puesto que la zona utilizada para la experimentación no había sido utilizada para el cultivo con anterioridad. La CIC es alta, con valores medios entre 36.4 y 37.6 meq/100. Estos datos se deben, sobre todo, a las características del suelo franco-arcilloso (Porta *et al.*, 2003; González-Flores *et al.*, 2017). En general, los datos de la CIC indican que el suelo es rico (Garrido, 1993).

La CE del suelo muestra una salinidad baja, puesto que sus valores son inferiores a 0.8. Aunque el porcentaje de MO del suelo es alto y, por consiguiente, ayuda a retener la humedad (Zhang y Wienhold, 2002), no se aprecia que aumente la CE del suelo, como sí ha ocurrido en otros estudios (Zhang y Wienhold, 2002; Sudduth *et al.*, 2003; Bañuelos *et al.*, 2007; Schroder *et al.*, 2008). De todos los parámetros analizados, solamente el Ca, Na y CIC tuvieron valores más altos en el primer análisis del suelo. Esto puede deberse a que, para el segundo análisis, el suelo ya había tenido una aplicación del biosólido. Por último, se observó que la saturación y la relación de Ca/Mg, Mg/K y Ca+Mg/K poseen valores óptimos (Molina y Meléndez, 2002), siendo aptos para el cultivo (Garrido, 1993).

4.4.2. Biosólidos

En relación con los análisis de los biosólidos, se debe tener en cuenta los metales pesados. La concentración de metales pesados en los biosólidos producidos en diferentes países puede diferir debido a las diferentes tecnologías de tratamiento de aguas residuales adoptadas o debido a la variación en la composición química de las aguas residuales generadas. Las concentraciones máximas permitidas para metales pesados en biosólidos de diferentes países se presentan en la tabla 35 (Sharma *et al.*, 2017). En relación con los biosólidos producidos en la PTAR Rafey, en referencia al contenido de metales pesados, se ha demostrado que son de excelente calidad, puesto que sus valores no sobrepasan lo establecido en las normas de otros países y regiones.

Tabla 35. Valores máximos de metales pesados permitidos en fertilizante

Metal Pesado (mg/kg) - País	Cadmio (Cd)	Cromo (Cr)	Cobre (Cu)	Plomo (Pb)	Mercurio (Hg)	Níquel (Ni)	Zinc (Zn)
Alemania	2	150	150	200	1	50	400
Bélgica	5	150	100	600	-	50	1000
Canadá	3	210	100	150	0.8	62	500
Francia	8	-	-	800	8	200	-
Suecia	3	150	150	150	3	50	500

Polonia	5	-	300	350	-	-	1500
España	10	400	450	300	7	120	1100
Reino Unido	1.5	100	200	150	1	50	400
Australia	3	-	200	200	-	-	250
Estados Unidos	4	100	300	150	0.5	50	400
Países Bajos	1	50	60	100	0.3	20	200
Austria	1	70	150	120	0.7	120	500
Dinamarca	0.8	-	1000	120	0.8	120	4000
Luxemburgo	1.5	100	100	150	1	150	400
India	5	50	300	100	0.15	100	1000
Colombia	40	1000	1000	300	10	80	2800
México	85	3000	4300	840	57	420	7500

Fuente: elaboración propia a partir de Sharma *et al.* (2017).

En relación al indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos, se ha podido comprobar que los biosólidos de la PTAR Rafey poseen valores apropiados y clasificados en la categoría A, según la Norma Mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002) y las normas de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA). En este sentido, ninguno de los dos análisis realizados ha proporcionado valores significativos de sustancias tóxicas.

Los valores de COT son muy altos y óptimos para el cultivo, si bien, se recomienda controlar los valores, puesto que una cantidad muy elevadas de COT puede generar problemas de nutrición en la planta (Andrades y Martínez, 2014). En este estudio, esto no ha sido un problema. Igualmente ocurre con los valores de Fe, N, n+n-N, P, Ca, Na, Mg y K, que son elevados en los biosólidos utilizados, pero óptimos para el cultivo, puesto que la propia planta los utiliza según sus necesidades requeridas (Garrido, 1993; Andrades y Martínez, 2014), si bien, para ello deben estar cerca de las raíces.

Ninguno de los valores obtenidos relativos a los biosólidos representa un exceso para la plantación y, por tanto, no surgen problemas para la captación de la luz solar necesaria para el desarrollo de la planta (Pérez, 2016). Estos resultados son mejores a los de otros biosólidos utilizados en otros países (González-Flores *et al.*, 2017). La cantidad de Cu cumple con los valores máximos permitidos, a excepción de los valores máximos exigidos en los Países Bajos (tabla 35). De todos los elementos analizados, en los biosólidos producidos en la PTAR Rafey destacan el N, Fe, Ca, P, Mg y K, todos ellos muy necesarios para el desarrollo del cultivo (Arévalo, 2016).

Tomando como base las informaciones anteriores, se puede indicar que los biosólidos producidos en la PTAR Rafey son óptimos para su utilización en la agricultura. Si bien, el aprovechamiento de los biosólidos se establece en función del tipo y clase, y su contenido de humedad debe ser inferior al 85%. El contenido de humedad del biosólido utilizado para la primera cosecha fue

de 74.7%, y para la segunda cosecha de 57.3%. De esta forma, la clasificación o características de los biosólidos utilizados en los dos cultivos de maíz realizados corresponden al tipo excelente clase A (tabla 36), por lo que se puede realizar el aprovechamiento del mismo como fertilizante y mejorador de suelos sin ninguna restricción.

Tabla 36. Aprovechamiento de biosólidos

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación • Los establecidos para clase B y C
Excelente o bueno	B	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación • Los establecidos para clase C
Excelente o bueno	C	<ul style="list-style-type: none"> • Usos forestales • Mejoramientos de suelos • Usos agrícolas

Fuente: elaboración propia.

4.4.3. Cultivos de maíz

Los cultivos se plantaron en cinco bloques de 324 m² cada uno. El bloque I fue el testigo. En el bloque II se cultivó el maíz acorde a los procedimientos tradicionales, según las técnicas recomendadas por el Ministerio de Agricultura de la República Dominicana. En el bloque III se aplicó al suelo la tasa agronómica de biosólidos, con ayuda de utensilios mecánicos, en un periodo no mayor a los 30 días, luego de sembrar el cultivo. En el bloque IV se aplicó al suelo la tasa agronómica de biosólidos a través del método en bandas, el cual consiste en aplicar el biosólido de manera superficial y sin mezcla, a un lado de la planta y en una sola hilera. En el bloque V se aplicó al suelo la tasa agronómica de biosólidos a través del método en bandas, incorporándolo mezclado previamente con el terreno a cultivar. La aplicación del biosólido se realizó en un periodo no mayor a los 30 días, luego de la siembra. Para la primera cosecha, en el bloque III, IV y V se usaron 15 t/ha de biosólidos. Para la segunda cosecha, se duplicó la cantidad (30 t/ha).

En los cultivos de la primera y segunda cosecha, el valor promedio de los diámetros del tallo de las plantas de los bloques I, IV y V han presentado mejores valores que los bloques II y III. A partir de una prueba ANOVA se han encontrado diferencias significativas, en la primera cosecha, entre el tratamiento utilizado en cada bloque y el diámetro del tallo de las plantas de maíz de cada bloque. No se encontraron diferencias significativas en la segunda cosecha. Estos datos pueden deberse a que el maíz de la segunda cosecha tenía un suelo más nutritivo y mejores condiciones climáticas y, por tanto, el biosólido no generó un resultado tan positivo como en la primera cosecha.

La altura de las plantas han obtenido mejores resultados para los bloques V y III. Los resultados mostraron que la longitud de las mazorcas del bloque V, tanto como para la primera como para la segunda cosecha, es mayor que la obtenida en los restantes bloques. Se encontraron diferencias significativas entre la altura de las plantas de la primera y segunda cosecha, y el tratamiento realizado en cada bloque.

Se evidenció, para la primera y segunda cosecha, un diámetro de la mazorca del bloque V mucho mayor que la de los restantes bloques, aunque el análisis estadístico no arrojó diferencias significativas entre el diámetro de las mazorcas de maíz de la primera y segunda cosecha y el tratamiento realizado en cada bloque.

Los bloques III y V mostraron un promedio mayor en relación a la cantidad de hileras por mazorca, aunque no se encontraron diferencias significativas entre cantidad de hileras por mazorca de maíz de la primera y segunda cosecha y el tratamiento realizado en cada bloque. Se encontró que el bloque V tenía un promedio mayor de granos por hilera de las mazorcas que la de los restantes bloques, aunque el análisis estadístico no mostró diferencias significativas entre la cantidad de granos por hilera en las mazorcas de maíz de la muestra de la primera y segunda cosecha y el tratamiento realizado en cada bloque.

Se encontró que el bloque V tenía un promedio mayor de granos por hilera en las mazorcas que la de los restantes bloques, aunque el análisis estadístico no mostró diferencias significativas entre la cantidad de granos por hilera en las mazorcas de maíz de la muestra de la primera y segunda cosecha, y el tratamiento realizado en cada bloque. Se encontraron una mayor cantidad de granos por mazorca en los bloques III y V frente al resto de bloques, encontrándose diferencias significativas entre el tratamiento de cada bloque y la cantidad de granos de maíz, tanto para la primera como para la segunda cosecha.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este apartado se divide en dos partes: hallazgos de la investigación y recomendaciones.

5.1. Hallazgos de la investigación

Las conclusiones de esta investigación son las siguientes:

- a) Se ha verificado que el biosólido utilizado y producido en la PTAR Rafey presentó características apropiadas para su utilización en la agricultura.

- b) Dadas las características físicas, químicas y microbiológicas de los biosólidos utilizados, se ha comprobado que los mismos son apropiados como fertilizante agrícola y para mejorar la calidad nutricional de los suelos.
- c) Se ha verificado que, de las técnicas de aplicación del biosólido utilizadas, las que presentan un mayor rendimiento del cultivo son la técnica incorporado pre-siembra (bloque V) y la técnica incorporado post-siembra (bloque III).
- d) Esta investigación ha verificado que el uso de los biosólidos producidos en la PTAR Rafey, como fertilizantes en el cultivo del maíz, genera mejores resultados que el fertilizante químico utilizado en la experimentación, si bien, los análisis estadísticos realizados han concluido que existen diferencias significativas, sobre todo, en el diámetro del tallo de la planta, en la altura de la planta y en la cantidad de granos de maíz por mazorca.
- e) Según la norma de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), de la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 de Protección Ambiental, Lodos y Biosólidos, y del Decreto Número 1287 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de la República de Colombia, el biosólido generado en la PTAR Rafey presenta unas características que lo clasifican como tipo A "Excelente".
- f) Los biosólidos producidos en la PTAR Rafey son recomendables, también, para la fertilización de suelos donde se cultiven otros productos agrícolas, utilizando, preferiblemente, la técnica de aplicación incorporado pre-siembra.
- g) La principal contribución de este estudio es que el biosólido producido en la PTAR Rafey genera resultados óptimos en el cultivo de maíz y tiene un costo más económico frente a los fertilizantes químicos. Además, la utilización del biosólido puede ayudar a reducir el uso de los fertilizantes químicos y, por consiguiente, ayudaría a reducir la contaminación ambiental del suelo y de los cuerpos hídricos. Por tanto, la CORAASAN puede fomentar el uso del biosólido en la agricultura, ayudando, con ello, a reducir la inversión realizada en el transporte y disposición final irracional o no adecuada de los lodos residuales deshidratados producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

5.2. Recomendaciones

- a) Aunque mediante este estudio se ha verificado que los lodos deshidratados utilizados y producidos en la PTAR Rafey presentan características apropiadas para su uso en la agricultura, se recomienda, antes de su utilización, la realización de los análisis físico-químicos y microbiológicos correspondientes, a fin de asegurar que los mismos cumplen con los valores normativos correspondientes.
- b) Se propone que para el aprovechamiento como fertilizante de los lodos deshidratados generados en la PTAR Rafey, luego de producidos, se depositen por un tiempo de, al menos, dos (2) meses en un área plana, protegida del alcance del agua y en una capa uniforme no mayor de 30 cm de espesor. Esto podría contribuir a agilizar el cumplimiento de los valores normativos referentes a los patógenos, parásitos y demás microorganismos potencialmente presentes.
- c) Como futura línea de investigación se recomienda determinar el tiempo óptimo requerido para el uso agrícola de los biosólidos producidos en la PTAR Rafey, a fin de garantizar que la cantidad de patógenos, parásitos y demás microorganismos potencialmente presentes cumplan con los valores normativos.
- d) Se recomienda la elaboración y establecimiento de una normativa referente a la recolección, transporte, aprovechamiento y disposición final de los lodos producidos en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales de la República Dominicana.

6. BIBLIOGRAFÍA

Akrivos, J., Mamais, D., Katsara, K., & Andreadakis, A. (2000). Agricultural utilisation of lime treated sewage sludge. *Water Science and Technology*, 42(9), 203-210.

Al-Gheethi, A. A., Efaq, A. N., Bala, J. D., Norli, I., Abdel-Monem, M. O., & Kadir, M. A. (2018). Removal of pathogenic bacteria from sewage-treated effluent and biosolids for agricultural purposes. *Applied water science*, 8(2), 74-99.

Andrade, M. L., Marceļ, P., Reyzábal, M. L., & Montero, M. J. (2000). Contenido, evolución de nutrientes y productividad en un suelo tratado con lodos residuales urbanos. *Edafología*, 7(3), 21-29.

Andrades, M., & Martínez, M.E. (2014). *Fertilidad del suelo y parámetros que la definen*. La Rioja (España): Universidad de la Rioja.

Arévalo Camacho, J.E. (2016). *Evaluación del aporte de gallinaza fresca en el rendimiento del cultivo de maíz variedad iniap-122, en dosis diferentes, en la parroquia Malchinguí, Cantón Pedro Moncayo, provincia Pichinga*. Loja (Ecuador): Universidad Nacional de Loja.

Banuelos, G. S., Pasakdee, S., Benes, S. E., & Ledbetter, C. A. (2007). Long-Term Application of Biosolids on Apricot Production. *Communications in soil science and plant analysis*, 38(11-12), 1533-1549.

Barbarick, K. A., & Ippolito, J. A. (2000). Nitrogen fertilizer equivalency of sewage biosolids applied to dryland winter wheat. *Journal of Environmental Quality*, 29(4), 1345-1351.

Bautista Cristóbal, R. (2005). *Análisis del crecimiento en plántulas de maíz (Zea mays L.) aplicando biosólidos*. México, Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". Tesis Doctoral.

Bougnom, B. P., Zongo, C., McNally, A., Ricci, V., Etoa, F. X., Thiele-Bruhn, S., & Piddock, L. J. (2019). Wastewater used for urban agriculture in West Africa as a reservoir for antibacterial resistance dissemination. *Environmental research*, 168, 14-24.

Cicek, N. (2003). A review of membrane bioreactors and their potential application in the treatment of agricultural wastewater. *Canadian Biosystems Engineering*, 45, 6-37.

Dalal, R. C., & Mayer, R. J. (1986). Long term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. II. Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. *Soil Research*, 24(2), 281-292.

De Anda Sánchez, J. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y ambiente*, (14), 119-143.

Eissa, F. I., Mahmoud, H. A., Massoud, O. N., Ghanem, K. M., & Goma, I. M. (2014). Biodegradation of chlorpyrifos by microbial strains isolated from agricultural wastewater. *Journal of American Science*, 10(3), 98-108.

Faour-Klingbeil, D., & Todd, E. C. (2018). The impact of climate change on raw and untreated wastewater use for agriculture, especially in arid regions: a review. *Foodborne pathogens and disease*, 15(2), 61-72.

Flores-Pardavé, L., Palacios-Vargas, J. G., Castaño-Meneses, G., & Cutz-Pool, L. G. (2011). Colémbolos de suelos agrícolas en cultivos de alfalfa y de maíz

adicionados con biosólidos en Aguascalientes, México. *Agrociencia*, 45(3), 353-362.

Fondahl, L. (1999). Biosolids management in the western region. *BioCycle*, 40(7), 70-74.

Garrido Valero, M.S. (1993). *Interpretación de análisis de suelos*. Madrid (España): Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Galafassi, G. (1998). Aproximación a la problemática ambiental desde las ciencias sociales. Un análisis desde la relación naturaleza-cultura y el proceso de trabajo. *Revista Theorethikos*, 1(6), 16-30.

González-Flores, E., Ramos-Barragán, J. E., Tornero-Campante, M. A., & Murillo-Murillo, M. (2017). Evaluación de dosis de biosólidos urbanos en maíz bajo condiciones de invernadero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(1), 119-132.

González Flores, E., Sandoval Castro, E., & Pérez Magaña, A. (2014). Biosólidos en la producción de maíz: impacto socioeconómico en zonas rurales del municipio de Puebla. *Estudios sociales*, 22(43), 61-86.

Guzmán, C., & Campos, C. (2004). Indicadores de contaminación fecal en biosólidos aplicados en agricultura. *Universitas Scientiarum*, 9(1), 59-67.

He, Z. L., Yang, X. E., & Stoffella, P. J. (2005). Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *Journal of Trace elements in Medicine and Biology*, 19(2-3), 125-140.

Hernández-Herrera, J. M., Olivares-Sáenz, E., Villanueva-Fierro, I., Rodríguez-Fuentes, H., Vázquez-Alvarado, R., & Pissani-Zúñiga, J. F. (2005). Aplicación de lodos residuales, estiércol bovino y fertilizante químico en el cultivo de sorgo forrajero (*Sorghum vulgare Pers.*). *Revista internacional de contaminación ambiental*, 21(1), 31-36.

Jorba, M., García-Moro, C., & Ninot i Sugrañes, J. M. (2013). Efectos de la aplicación de biosólidos en plantaciones de especies leñosas para restauración de canteras de caliza mediterráneas. *Ecología*, 25, 109-118.

Londoño, N. A. C., Suárez, D. G., Velásquez, H. I., & Ruiz-Mercado, G. J. (2017). Energy analysis for the sustainable utilization of biosolids generated in a municipal wastewater treatment plant. *Journal of cleaner production*, 141, 182-193.

López Galán, E., & Miñano Fernández, F. (1988). *Métodos rápidos de análisis de suelos*. Madrid (España): Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

López, F. A. O., González, A. R., & Guzmán, J. M. G. (2017). Comparación de la reglamentación para el manejo de lodos provenientes de agua residual en Argentina, Chile y Colombia. *RIAA*, 8(1), 227-237.

Martínez, A., Castillo, J., & Orgaz Agüera, F. (2016). Propuesta metodológica para el aprovechamiento de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales en agricultura. Un estudio de caso en República Dominicana. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, 9(26), 1-9.

Martínez Cortijo, F.J. (2003). *Estudio agronómico y ambiental del riego con aguas residuales depuradas en el cultivo del arroz. Aplicación a una línea de riego en el Parque Natural de la Albufera (Valencia)*. Valencia (España): Universidad Politécnica de Valencia.

Ministerio de Agricultura (2015). Siembra, cosecha y producción agropecuaria. Disponible en: <http://www.agricultura.gob.do/estadisticas/siembra-cosecha-y-produccion-agropecuaria/>

Molina, E., & Meléndez, G. (2002). *Tabla de interpretación de análisis de suelos*. San José (Costa Rica): Centro de Investigación Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.

Navarro, A. M., & Zamudio, M. A. F. (2016). Reutilización de agua para la agricultura y el medioambiente. *Agua y Territorio*, (8), 80-92.

Odlare, M., Pell, M., & Svensson, K. (2008). Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues. *Waste management*, 28(7), 1246-1253.

Pérez Cebrián, A. (2016). *Estudio bibliográfico del uso de lodos de depuradora en suelos agrícolas*. Gandía (España): Universidad Politécnica de Valencia.

Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Bilbao (España): Mundi-Prensa.

Quist-Jensen, C. A., Macedonio, F., & Drioli, E. (2015). Membrane technology for water production in agriculture: Desalination and wastewater reuse. *Desalination*, 364, 17-32.

Rivas, C.F., De La Cruz, C., De La Cruz, R., De La Cruz, O., & Colivet, J. (2012). Análisis correlacional y contenido de metales pesados en sedimentos superficiales de la avenida Argimiro Gabaldón de la ciudad de Barcelona, Estado Anzoátegui, Venezuela. *Avances en Química*, 7(2), 111-117.

Rivera, H., Chira, J., Campián, M., & Cornelio, F. (2008). Análisis correlacional y evolutivo de los metales pesados en sedimentos del río Santa entre Huaraz-Carhuaz, departamento de Ancash. *Revista del Instituto de Investigación de*

la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, 11 (21), 19-24.

Robledo Santoyo, E. (2012). *Manejo y uso de biosólidos en suelos agrícolas*. Montecillo, México: Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas.

Rocamora, I. N., Porto, C. G., Alonso, L. P., & Navarro-García, F. (2015). Uso de lodos de depuradora en agricultura: patógenos y resistencias a antibióticos. *Revista de Salud Ambiental*, 15(2), 113-120.

Schroder, J. L., Zhang, H., Zhou, D., Basta, N., Raun, W. R., Payton, M. E., & Zazulak, A. (2008). The effect of long-term annual application of biosolids on soil properties, phosphorus, and metals. *Soil Science Society of America Journal*, 72(1), 73-82.

Sharma, B., Sarkar, A., Singh, P., & Singh, R. P. (2017). Agricultural utilization of biosolids: A review on potential effects on soil and plant grown. *Waste Management*, 64, 117-132.

Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Bollero, G. A., Bullock, D. G., & Wiebold, W. J. (2003). Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. *Agronomy Journal*, 95(3), 472-482.

Toledo, V. M., & De Molina Navarro, M. L. G. (2007). El metabolismo social: las relaciones entre la sociedad y la naturaleza. En: *El paradigma ecológico en las ciencias sociales*(pp. 85-112). Icaria.

Torres, G., & Zárate, V. (1997). "Factibilidad de tratamiento y disposición de lodo residual de una planta de tratamiento de aguas residuales ubicada en el Edo. de Nuevo León México". En: *70th annual Conference y Exposition*, Water Environment Federation (vol. 14), Chicago, Illinois.

Uribe Montes, H. R., Orozco Henández, G., Chávez Sánchez, N., & Espino Valdez, M. (2002). "Factibilidad económica del uso de biosólidos en el cultivo de maíz forrajero". En: *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 28 (pp. 1-6). FEMISCA.

Utria-Borges, E., Cabrera-Rodríguez, J. A., Reynaldo-Escobar, I. M., Morales-Guevara, D., Fernández, A. M., & Toledo Toledo, E. (2008). Utilización agraria de los biosólidos y su influencia en el crecimiento de plántulas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 14(1), 33-39.

Villalobos, J. A. M., Rodríguez, H. M., Ramírez, G. D., González, M. R., Ibarra, M. A. I., & Salcedo, M. D. R. J. (2017). Niveles de nitrógeno y fósforo en maíz (*zea*

mayz I.) forrajero bajo riego con aguas residuales tratadas. *Agrofaz: publicación semestral de investigación científica*, 17(2), 45-52.

Ye, L., & Zhang, T. (2011). Pathogenic bacteria in sewage treatment plants as revealed by 454 pyrosequencing. *Environmental science & technology*, 45(17), 7173-7179.

Zamora, F., Salcedo, E., & Aguayo, A. (1999). "Efecto de la aplicación de lodos residuales como abono orgánico en el cultivo de maíz". En: *Memoria del VIII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería y IV Congreso Latinoamericano de Biotecnología y Bioingeniería*. Huatulco, Oaxaca, México.

Zhang, R., & Wienhold, B. J. (2002). The effect of soil moisture on mineral nitrogen, soil electrical conductivity, and pH. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 63(2-3), 251-254.

Zhou, H., & Smith, D. W. (2002). Advanced technologies in water and wastewater treatment. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 1(4), 247-264.

Recibido: 11/01/2020

Reenviado: 17/03/2020

Aceptado: 22/04/2020

Sometido a evaluación de pares anónimos

