

APROVECHAMIENTO DE LOS BIOSÓLIDOS PROCEDENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS URBANAS EN AGRICULTURA. ESTUDIO DE CASO EN REPÚBLICA DOMINICANA

Atuey de Jesús Martínez Durán¹

Universidad Tecnológica de Santiago

atueymartinez@hotmail.com

José del Carmén Castillo Jáquez²

Universidad Tecnológica de Santiago

j_castillo@utesa.edu

Vladimir A. Rodríguez Núñez³

Universidad Tecnológica de Santiago

Corporación del Acueducto y Alcantarillado de Santiago

Vladimir.rn@hotmail.com

Francisco Orgaz Agüera⁴

Universidad Tecnológica de Santiago

franorgaz@utesa.edu

Para citar este artículo puede utilizar el siguiente formato:

Atuey de Jesús Martínez Durán, José del Carmén Castillo Jáquez, Vladimir A. Rodríguez Núñez y Francisco Orgaz Agüera (2020): "Aprovechamiento de los biosólidos procedentes de plantas de tratamiento de aguas urbanas en agricultura. Estudio de caso en República Dominicana", Revista DELOS, Vol 13 N° 37 (diciembre 2020). En línea: <https://www.eumed.net/es/revistas/delos/vol-13-no-37-diciembre-2020/aprovechamiento-biosolidos>

RESUMEN

En Santiago de los Caballeros, la segunda ciudad más importante de República Dominicana, la Corporación del Acueducto y Alcantarillado de Santiago está obligada a invertir cuantiosos recursos económicos para el retiro físico y disposición final de los biosólidos producidos en las

¹ Director, docente e investigador de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de Santiago (UTESA). Ingeniero Civil, con Maestría en Ingeniería Ambiental. Correo electrónico: atueymartinez@hotmail.com

² Director, docente e investigador del Departamento de Ciencias Naturales de la Universidad Tecnológica de Santiago (UTESA). Ingeniero Químico, con Doctorado en Ingeniería Química. Correo electrónico: j_castillo@utesa.edu

³ Docente e investigador de la Universidad Tecnológica de Santiago (UTESA) y encargado del Departamento de Aguas Residuales Rafey en la Corporación del Acueducto y Alcantarillado de Santiago (CORAASAN). Ingeniero Civil, con Maestría en Gestión Ambiental. Correo electrónico: Vladimir.rn@hotmail.com

⁴ Docente, investigador y Vicerrector de Producción e Investigación Científica de la de la Universidad Tecnológica de Santiago (UTESA). Doctor en Turismo, con Maestría en Energías Renovables y Gestión del Medio Ambiente. Correo electrónico: franorgaz@utesa.edu

Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), al considerarse residuos contaminantes. El objetivo general de esta investigación es analizar las características de los biosólidos producidos en la PTAR Rafey, la cuál es la más importante de la ciudad. Así, se busca determinar el potencial aprovechable de dichos biosólidos en la agricultura, uno de los principales sectores económicos del país. Se ha realizado una experimentación en cinco bloques parcelarios, con tres aplicaciones diferentes de los biosólidos, con un bloque testigo y con un bloque fertilizado con abono químico. Se analizaron en laboratorio las características del suelo y de los biosólidos, y se analizó el comportamiento del cultivo de maíz en cada bloque. Los datos recogidos se tabularon en Excel y se analizaron mediante el programa SPSS. Destacaron los bloques fertilizados con los biosólidos. La principal conclusión es que los biosólidos producidos en la PTAR Rafey tiene características óptimas para su aprovechamiento agrícola, pudiendo así solucionarse el problema ambiental que genera su disposición final en la actualidad. Además, se ha comprobado que los biosólidos producidos en la PTAR Rafey, utilizados como fertilizantes en el cultivo del maíz, han generado mejores resultados que los fertilizantes químicos utilizado en la experimentación.

PALABRAS CLAVE: biosólido, agricultura, cultivo, tratamiento de desechos, aguas residuales.

USE OF BIOSOLIDS FROM URBAN RWTP IN AGRICULTURE. CASE STUDY IN THE DOMINICAN REPUBLIC

ABSTRACT

In Santiago de los Caballeros, the second most important city in the Dominican Republic, the Santiago Aqueduct and Sewer Corporation is forced to invest large economic resources for the physical withdrawal and final disposal of the biosolids produced in the Wastewater Treatment Plants (WWTP), when considering polluting waste. The general objective of this research is to analyze the characteristics of the biosolids produced in the Rafey WWTP, which is the most important in the city. Thus, it seeks to determine the potential use of these biosolids in agriculture, one of the main economic sectors of the country. An experiment has been carried out in five parcel blocks, with three different applications of biosolids, with a control block and with a block fertilized with chemical fertilizer. The characteristics of the soil and biosolids were analyzed in the laboratory, and the behavior of the corn crop in each block was analyzed. The collected data were tabulated in Excel and analyzed using the SPSS program. The blocks fertilized with biosolids stood out. The main conclusion is that the biosolids produced in the Rafey WWTP have optimal characteristics for their agricultural use, thus being able to solve the environmental problem generated by their final disposal at present. In addition, it has been proven that the biosolids produced at the Rafey WWTP, used as fertilizers in corn cultivation, have generated better results than the chemical fertilizers used in experimentation.

KEYWORDS: biosolid, agriculture, cultivation, waste treatment, sewage water.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la industrialización y el rápido crecimiento de la población han aumentado el uso de los recursos naturales y la producción de residuos (Collivignarelli, Canato, Abba, y Miino, 2019). En las zonas urbanas, los desechos sólidos provienen de diferentes fuentes, como las áreas residenciales, industriales, comerciales y de uso recreativo (Sharma, Sarkar, Singh, y Singh, 2017). A nivel mundial, se generan más de 4 billones de toneladas de desechos sólidos, perteneciendo casi 2 billones de toneladas a los desechos sólidos municipales (Vaish, Srivastava, Singh, Singh, Singh y Singh, 2016).

Los desechos sólidos que genera un país dependen de la prosperidad económica de la región y de la fuerza de su población urbana (Hassan, 2000). En los países desarrollados, las áreas residenciales aportan entre el 25–35 % del total de residuos generados en los países (Banco Mundial, 1999). Actualmente, las ciudades del mundo generan 1300 billones de toneladas de residuos sólidos y posiblemente se alcancen los 2200 billones de toneladas en el año 2025 (Hoornweg y Bhada-Tata, 2012).

Para desarrollar una economía circular, es necesario estudiar y promover soluciones alternativas para la eliminación de los residuos, desarrollando acciones como la reutilización (Collivignarelli *et al.*, 2019). Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) pueden ser una parte importante en la sostenibilidad circular, debido a que generan un lodo que, tratándose, pueden convertirse en residuos más estabilizados y reutilizables, denominados biosólidos (Collivignarelli *et al.*, 2019).

Los biosólidos corresponden a un tipo de desechos orgánicos (Singh, Sharma, Sarkar, Sengupta, Singh y Ibrahim, 2014) y son restos sólidos biológicos insolubles o restos orgánicos resultantes de los diferentes procesos de tratamiento de las aguas residuales en las PTAR (Marguí, Iglesias, Camps, Sala e Hidalgo, 2016). Según Ukwatta, Mohajerani, Eshtiaghi y Setunge (2016), el término biosólido indica un lodo que ha recibido uno o más tratamientos, como la digestión aeróbica o anaeróbica, la estabilización alcalina, el secado térmico, entre otros.

Los biosólidos son sólidos orgánicos estabilizados derivados de procesos de tratamiento de aguas residuales que pueden manejarse de manera segura para ser utilizados de forma beneficiosa, ya sea por sus nutrientes, energía u otros valores (Ashekuzzaman, Forrestal, Richards y Fenton, 2019). La eliminación inadecuada de estos desechos sólidos son una amenaza para el medio ambiente, lo que genera problemas como la contaminación del agua subterránea o la degradación de la calidad del suelo (Sharma *et al.*, 2017).

En los últimos años se han analizado diferentes enfoques para la eliminación segura de los biosólidos, como la incineración (Impellitteri, Harmon, Silva, Miller, Scheckel, Luxton y

Panguluri, 2013), su aplicación al suelo (Sánchez-Monedero, Mondini, De Nobili, Leita y Roig, 2004) o su uso como fertilizante (Marguí *et al.*, 2016), si bien, muchas de estas prácticas han sido prohibidas en algunos países por los aspectos perjudiciales que pueden provocar, como la contaminación (Singh y Agrawal, 2008).

En la literatura científica, el uso agrícola de los biosólidos es una de las opciones más recomendadas, tanto para mejorar los suelos como para fertilizar cultivos (Sharma *et al.*, 2017). Los principales componentes de los biosólidos son la materia orgánica (MO) y los nutrientes beneficiosos para las plantas, especialmente el nitrógeno (N) y el potasio (P) (Latare, Kumar, Singh y Gupta, 2014). Sin embargo, dada la naturaleza y características fisicoquímicas de los biosólidos, éstos deben analizarse químicamente antes de su aplicación a las tierras agrícolas (Sharma *et al.*, 2017), sobre todo, para controlar la presencia de ciertos metales pesados tóxicos (Türkdoğan, Kilicel, Kara, Tuncer y Uygan, 2003), patógenos (Al-Gheethi, Efaq, Bala, Norli, Abdel-Monem y Kadir, 2018) u otros contaminantes orgánicos (Mattana, Petrovičová, Landi, Gelsomino, Cortés, Ortiz y Renella, 2014).

La principal razón para la contaminación por metales pesados en los biosólidos es el sistema de alcantarillado urbano no planificado o mal administrado, que conduce a la mezcla de aguas residuales con aguas residuales industriales, comerciales o de otra índole (Healy, Fenton, Forrester, Danaher, Brennan y Morrison, 2016), donde se encuentran residuos provenientes de los pesticidas, insecticidas, desinfectantes, productos farmacéuticos, detergentes, productos para el cuidado personal y de hormonas esteroideas (Luo, Guo, Ngo, Nghiem, Hai, Zhang y Wang, 2014).

Además de los beneficiosos nutrientes que el biosólido proporciona a las plantas, su aplicación en el suelo puede eliminar el uso de la fertilización química en las tierras de cultivo (Mehrotra, Kundu y Sreekrishnan, 2016) y mejorar las condiciones físicas del suelo (Mtshali, Tiruneh y Fadiran, 2014). Estos elementos han generado que la utilización agrícola de los biosólidos se haya convertido en una práctica común en todo el mundo (Sharma *et al.*, 2017), comprobándose que fomenta el crecimiento de las plantas (Singh y Agrawal, 2008).

Los biosólidos generados por las PTAR en la República Dominicana aumentan por el incremento de la población, sobre todo, en las dos grandes ciudades: Santo Domingo y Santiago de los Caballeros. La problemática de esta investigación surge por la ausencia de estudios 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 de los Caballeros (CORAASAN), institución pública encargada de gestionar el agua potable de la ciudad, está obligada a invertir, anualmente, cuantiosos recursos económicos para el retiro físico y disposición final de estos materiales, al considerarlos residuos contaminantes.

Entre las diferentes PTAR de la ciudad de Santiago de los Caballeros, la PTAR Rafey produce, diariamente, unos 25 m³ de biosólidos, que son vertidos de forma irracional e inadecuada en

terrenos aledaños, generando impactos ambientales y de salud negativos en las comunidades próximas. En este aspecto, el objetivo general de este estudio es analizar las características de los biosólidos producidos en la PTAR Rafey, así como determinar el potencial aprovechable de dichos biosólidos a partir de sus características físicas, químicas y microbiológicas. Además, se busca establecer la clasificación para el aprovechamiento agrícola de los biosólidos en el cultivo de maíz.

Se seleccionó este cultivo para la experimentación, debido a que la producción promedio anual de maíz en los últimos años ha sido del 5,7 % de la demanda nacional (Ministerio de Agricultura, 2015). Las plantaciones de maíz requieren entre 174-193 kg/ha de nitrógeno (N), entre 19-28 kg/ha de fósforo (P) y 108 kg/ha de potasio (K) (Silva, Torres y Madera, 2008) y, por tanto, pueden ser un buen destino para los biosólidos. Por tanto, esta investigación se enfoca en el aprovechamiento agrícola de los biosólidos producidos en la PTAR Rafey.

2. METODOLOGÍA

La zona experimental seleccionada corresponde a una Finca Experimental ubicada a unos 20 km de la PTAR Rafey. Esta finca tiene una precipitación anual de 660 mms, con una zona de vida de bosque seco y con temperaturas promedios de 28-30 °C. El suelo de la Finca tiene una textura franco-arcillosa, con un pH ligeramente alcalino y abastecido con agua proveniente del río Yaque del Norte. El suelo a cultivar no está afectado por el nivel freático.

El área de estudio se dividió en cinco bloques parcelarios cuadrados de 324 m² cada uno:

- Bloque I. Testigo: Al suelo no se le aplicó biosólidos o fertilizantes químicos. Se utilizaron, solamente, los tratamientos de control fitosanitario recomendados por el Ministerio de Agricultura de la República Dominicana.
- Bloque II. Se cultivó el maíz acorde a los procedimientos tradicionales, según las técnicas recomendadas por el Ministerio. Se utilizó el fertilizante 16-20-0-5S, recomendado por el Ministerio, en una dosis de 29lb/ha en cada cosecha.
- 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. 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.
- Bloque IV. El biosólido se aplicó en cada hilera del cultivo utilizando la técnica en bandas sin ser incorporado o mezclado con el suelo, a un lado de la planta y en una sola hilera. La aplicación del biosólido se realizó en un periodo no mayor a los 30 días, luego de sembrar el cultivo.

- Bloque V. 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).

En los bloques se utilizaron los tratamientos de control fitosanitario recomendados por el Ministerio de Agricultura de la República Dominicana. En cada uno de los bloques se desarrollaron dos cosechas, una a finales del año 2017 y otra a mediados de 2018.

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. Esta semilla fue donada para la investigación por el propio Ministerio de Agricultura. Para el proceso de preparación del suelo y siembra se utilizaron maquinarias agrícolas.

Se realizaron cuatro análisis en laboratorio: uno para analizar el suelo de los bloques, previo a la primera siembra; otro para analizar el suelo de los bloques, previo a la segunda siembra; otro para analizar los biosólidos utilizados para el primer cultivo de maíz; y otro para analizar los biosólidos utilizados para el segundo cultivo de maíz.

En relación al estudio del suelo, se analizaron los siguientes parámetros: 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 este análisis se contrataron los servicios de la empresa dominicana FERSAN. Para que la muestra fuera representativa, para cada análisis se obtuvieron 55 submuestras tomadas de forma homogénea por toda la superficie 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 determinada entre los 0-10 cm, siguiendo las recomendaciones científicas (López y Miñano, 1988).

En relación al análisis de los biosólidos, se analizaron los siguientes parámetros⁵: alcalinidad (SM 2320B), coliformes fecales (SM9221 B/E), humedad (ASTM D-2974), metales pesados (EPA 6010B), sólidos suspendidos (SM2540 D), pH (SM 4500HB), salmonela (SM9260 D), temperatura (EPA 170.1), nitrógeno total (SM 4500N), 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), herbicidas (EPA 8151A), mercurio (EPA 7470A) y pesticidas (EPA 8081A).

Los biosólidos analizados son de carácter urbano, y estabilizados en la misma PTAR Rafey por medio de una aireación extendida, con lo cual se eliminan una gran cantidad de

⁵ Entre paréntesis se incluye el método de análisis utilizado.

microorganismos patógenos; posteriormente, estos lodos son deshidratados. Para el análisis de los biosólidos, se contrataron los servicios de la empresa puertorriqueña EQLAB. Los biosólidos utilizados para fertilizar el suelo fueron seleccionados en la PTAR Rafey, de manera independiente para cada cosecha, y transportados y depositados en un área de la Finca Experimental, adyacente al terreno correspondiente a los cinco bloques experimentales.

La toma de muestras de los biosólidos, para el análisis en laboratorio, fue realizada en la Finca. La primera muestra, utilizada para la primera cosecha, fue realizada 30 días después de que los biosólidos hayan sido 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 (cerca al 80 %), en virtud de la condición climática (lluvia frecuente). La segunda toma de muestras, utilizada para la segunda cosecha, fue realizada 60 días después del haber sido producido el biosólido. En este caso, el clima permaneció seco hasta el momento de la toma de muestra.

Para el análisis 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.

El proceso de experimentación se ha realizado durante las dos cosechas. La primera cosecha se realizó desde el mes de noviembre de 2017 al mes de febrero del año 2018. Previamente al inicio de esta siembra, se realizaron los primeros análisis de suelo y de los biosólidos. La segunda cosecha se realizó desde el mes de septiembre de 2018 al mes de enero de 2019. Previamente al inicio de la segunda siembra, se realizaron los segundos análisis del suelo y de los biosólidos.

Los datos referentes a los análisis del suelo y de los biosólidos fueron suministrados por las empresas contratadas. En relación al cultivo de maíz, los datos se anotaron en un cuaderno de notas. Todos los datos se tabularon en el paquete Microsoft Excel 2016 y, posteriormente, se traspasaron al programa IBM SPSS v. 24 para el análisis estadístico.

3. RESULTADOS

3.1. Análisis del suelo

En la tabla 1 se muestran los valores de los parámetros analizados en el suelo de la Finca. El 73,3 % de los parámetros analizados obtienen una mayor representatividad en el segundo análisis, después de recolectar la primera cosecha. Solamente Ca, Na, CIC y B obtuvieron valores más elevados en el primer análisis. Estos resultados podrían deberse a los nutrientes aportados por los biosólidos, utilizados para fertilizar los bloques de la primera cosecha.

Tabla 1. Valores promedios de cada parámetro analizado

PARÁMETROS	PS	SS
Materia orgánica (MO)	4,5 %	4,9 %
Fósforo (P)	16,2 ppm	35,6 ppm
Potasio (K)	642,6 ppm	710,4 ppm
Magnesio (Mg)	715 ppm	806 ppm
Calcio (Ca)	5960 ppm	5550 ppm
Sodio (Na)	39,4 ppm	33,4 ppm
pH	7,5	7,7
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	37,6 meq/100g	36,4 meq/100g
Azufre (S)	12,8 ppm	15,2 ppm
Zinc (Zn)	2,2 ppm	3,1 ppm
Manganeso (Mn)	52,2 ppm	60 ppm
Hierro (Fe)	8,6 ppm	29,6 ppm
Cobre (Cu)	4,6 ppm	5,6 ppm
Boro (B)	2,4 ppm	2,3 ppm
Conductividad Eléctrica (CE)	0,32 mmhos/cm	0,34 mmhos/cm

Leyenda: PS: análisis previo a la primera siembra; SS: análisis previo a la segunda siembra

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 2 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 2. Análisis de muestras de suelo tomadas en bloques experimentales

	SATURACIÓN						Al	RELACIONES					
	K		Mg		Ca			Ca/Mg		Mg/k		Ca + Mg/k	
	PS	SS	PS	SS	PS	SS		PS	SS	PS	SS	PS	SS

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

Leyenda: PS: análisis previo a la primera siembra; SS: análisis previo a la segunda siembra

Fuente: Elaboración propia.

En relación a los datos anteriores, se calculó la dosis de biosólido a aplicar en cada cosecha. En este sentido, se tomó como base una demanda de nitrógeno 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 biosólido para la primera cosecha, la cual fue aplicada a los bloques III, IV y V. Para la segunda cosecha, se duplicó la dosis del biosólido, es decir, se aplicaron a cada uno de los tres bloques (III, IV y V) 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.

3.2. Análisis de los biosólidos

La tabla 3 muestra los valores de los metales pesados (mg/kg) incluidos en los biosólidos utilizados para la primera y la segunda cosecha, así como los valores promedio de ambos análisis (mg/kg), 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 buena calidad.

Los valores promedio indican una secuencia de abundancia de Cr > Zn > Cu > Ni > Pb > Cd. No se encontraron valores representativos de As y Hg. Los datos de la desviación estándar muestran heterogeneidad en las variables analizadas y, por consiguiente, invitan a realizar más análisis descriptivos para conocer la relación entre las variables.

Tabla 3. Valores obtenidos en el análisis de los metales pesados de los biosólidos de la PTAR Rafey

METAL PESADO	ANÁLISIS PARA PS	ANÁLISIS PARA SS	MEDIA DE LOS VALORES PC Y SC	ERROR ESTÁNDAR	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
--------------	------------------	------------------	------------------------------	----------------	---------------------

Arsénico (As)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cadmio (Cd)	2,58	1,09	1,83	0,74	1,05
Cromo (Cr)	602	1602	1102	500	707,10
Cu	40,1	87,01	63,55	23,45	33,17
Plomo (Pb)	11,5	12,2	11,85	0,35	0,49
Mercurio (Hg)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Níquel (Ni)	21,1	19,6	20,35	0,75	1,06
Zn	102	131	116,5	14,50	20,50

Leyenda: PS: análisis previo a la primera siembra; SS: análisis previo a la segunda siembra

Fuente: Elaboración propia.

Entre los análisis más utilizados en la literatura científica para asociar metales pesados está el estudio de correlación de Pearson (Rivera, Chira, Campián y Cornelio, 2008; Rivas, De La Cruz, De La Cruz, De La Cruz y Colivet, 2012). En la tabla 4 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 indica que podrían tener el mismo origen de procedencia (Rivera *et al.*, 2008).

Tabla 4. 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
-----------	---------	--------	--------	--------	---------	---

Leyenda: **La correlación es significativa en el nivel 0,01.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis del indicador bacteriológico de contaminación, los patógenos y los parásitos muestran que el biosólidos posee una clase A (NOM-004-SEMARNAT, 2002). Esto se debe a que: (a) los coliformes fecales tuvieron un valor en el biosólido de 1700 NMP/g para la primera cosecha, y de 260 NMP/g para la segunda; (b) el valor de la salmonela incluida en los biosólidos fue menor a 0,72 NMP/g para la primera cosecha, y menor a 0,3 NMP/g para la segunda; y (c) los huevos de helmito tuvieron un valor menor a 1 s/g, tanto para el biosólido utilizado en la primera cosecha como en la segunda. De igual manera, las pruebas CRETIB (corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico-infeccioso) realizadas a los biosólidos de la PTAR Rafey mostraron que son seguros para su uso en la agricultura.

En la tabla 5 se muestran los valores correspondientes a los macros y micro-nutrientes contenidos en los biosólidos utilizados como fertilizantes para el cultivo del maíz. Se puede observar que los biosólidos utilizados para la segunda cosecha tiene valores superiores a los obtenidos en el primer análisis. 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.

Tabla 5. Valores correspondientes a los macros y micro-nutrientes contenidos en los biosólidos utilizados como fertilizantes en el cultivo del maíz

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR	
		PS	SS
Carbono Orgánico Total (COT)	Mg/Kg	226	596
Nitrato y Nitrito Total (n+n-N)	Mg/Kg	5,15	225
N	Mg/Kg	5565	8844
P	Mg/Kg	1313	3444
K	Mg/Kg	798	977
Ca	Mg/Kg	3805	4438

Na	Mg/Kg	152	208
Fe	Mg/Kg	8259	8297
Zn	Mg/Kg	102	131
Cu	Mg/Kg	40,1	87,01
Mg	Mg/Kg	2941	3000

Leyenda: PS: valor del parámetro del suelo en muestra analizada para la primera cosecha de maíz; SS: valor del parámetro del suelo en muestra analizada para la segunda cosecha de maíz.

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Análisis del cultivo de maíz

La medición del diámetro del tallo de las plantas de la muestra de la primera cosecha se realizó el 28/01/2018, a los 30 días de la nacencia. La medición de la segunda cosecha fue realizada el 9/11/2018, también a los 30 días de la nacencia. En la primera cosecha, los valores promedio indican una secuencia de bloque I (19,95 mm), bloque V (19,69 mm), bloque IV (19,26 mm), bloque III (16,79 mm) y bloque II (14,23 mm). Para la segunda cosecha, los valores promedio indican una secuencia de bloque V (26,01 mm), bloque IV (25,04 mm), bloque I (24,96 mm), bloque III (24,66 mm) y bloque II (24,09 mm). En este sentido, los diámetros de los tallos de las plantas de la segunda cosecha presentan valores muy superiores a los de la primera cosecha. Esta situación podría ser atribuible a las mejores condiciones climáticas que tuvo la segunda cosecha con respecto a la primera. A través de un análisis ANOVA del diámetro del tallo de las plantas de maíz para la primera cosecha, se encontraron diferencias significativas entre el diámetro y el tratamiento utilizado en cada bloque ($F = 8430$, $p\text{-valor} = 0,000$). Para el caso de la segunda cosecha, no hay evidencias significativas ($F = 2212$, $p\text{-valor} = 0,077$).

En relación a la altura promedio de las plantas de la primera cosecha, cuya medición se realizó a los 30 días de la nacencia, se observa una secuencia de bloque III (208,3mm), bloque I (190,9 mm), bloque II (181,9 mm), bloque V (178,5 mm) y bloque IV (160,7 mm). Para la segunda cosecha, la medición también se realizó a los 30 días de la nacencia, observándose la secuencia de bloque V (201,9 mm), bloque III (175,3 mm), bloque I (159,0 mm), bloque II (152,9 mm) y bloque IV (146,9 mm). 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 ($F = 1750$, $p\text{-valor} = 0,000$).

La longitud de las mazorcas de maíz para la primera cosecha indica una secuencia de bloque V (13,9 mm), bloque II (13,1 mm), bloque I (12,5 mm), bloque III (12,2 mm) y bloque IV (11,1 mm). En la segunda cosecha, la secuencia es bloque V (14,0 mm), bloque III (13,8 mm), bloque I y II (12,9 mm) y bloque IV (12,1 mm). No se observan diferencias significativas entre la longitud de la mazorca de maíz de la primera cosecha y el tratamiento realizado en cada bloque ($F = 3372$, p -valor = 0,013). En la segunda cosecha, aunque las mazorcas del bloque V tienen mayor longitud al resto de los bloques, no hay diferencias significativas entre la longitud de la mazorca de maíz y el tratamiento realizado en cada bloque ($F = 1046$, p -valor = 0,389).

En relación al diámetro (grosor) de las mazorcas de la primera cosecha se sigue una secuencia de bloque V (48,7 mm), bloque II (46,9 mm), bloque II (45,1 mm), bloque I (44,6 mm) y bloque IV (43,3 mm). La segunda cosecha indica una secuencia de bloque IV (51,3 mm), bloque V (49,6 mm), bloque II (48,8 mm), bloque I (47,8 mm) y bloque III (44,7 mm). Aunque en el bloque V las mazorcas presentaron un mayor diámetro en ambas cosechas, no se evidencian diferencias significativas entre el diámetro de las mazorcas de maíz y el tratamiento realizado en cada uno de los diferentes bloques, tanto para la primera cosecha ($F = 2142$, p -valor = 0,082) como para la segunda ($F = 2116$, p -valor = 0,087).

Sobre la cantidad de hileras por mazorca y para la primera cosecha, se sigue una secuencia de bloque III (16,1), bloque V (15,5), bloque II (15,1), bloque I (14,7) y bloque IV (14,1). Para la segunda cosecha, se sigue una secuencia de bloque I (16,7), bloque V (16,2), bloque III (16,1), bloque II (15,4) y bloque IV (15,3). Aunque los bloques III y V tuvieron mejores promedios en la primera cosecha, no existen diferencias significativas entre la cantidad de hileras por mazorca de maíz y el tratamiento realizado en cada bloque ($F = 2250$, p -valor = 0,070). Tampoco hay diferencias significativas en la segunda cosecha ($F = 1219$, p -valor = 0,310).

En relación a la cantidad de granos por hilera de mazorca se sigue, para la primera cosecha, la secuencia de bloque V (30,4), bloque II y III (29,0), bloque I (26,6) y bloque IV (24,9). En la segunda cosecha la secuencia ha sido de bloque III y V (28,0), bloque I (25,0), bloque II (24,0) y bloque IV (23,0). No se evidencian diferencias significativas entre la cantidad de granos por hilera en las mazorcas de maíz de la muestra de la primera cosecha ($F = 1597$, p -valor = 0,182) y de la segunda cosecha ($F = 1480$, p -valor = 0,216) con el tratamiento realizado en cada bloque.

Para la primera cosecha, el promedio de granos de maíz en cada mazorca indica una secuencia de bloque V (471,2), bloque III (466,9), bloque II (437,9), bloque I (391,0) y bloque IV (351,1). Para la segunda cosecha, el promedio de granos de maíz en cada mazorca sigue la secuencia de bloque V (453,6), bloque III (450,8), bloque I (417,5), bloque II (369,6) y bloque IV (351,9). Se evidencian 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).

4. DISCUSIÓN

4.1. Suelos

Los suelos de la Finca Experimental utilizados para el cultivo eran de calidad baja, si bien, se encontraron algunos nutrientes. El pH del suelo era ligeramente alcalino, con un valor óptimo 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. La diferencia puede deberse a que, en el segundo análisis del suelo, el mismo aún 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 también 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 adecuados para el suelo (González-Flores, Sandoval-Castro y Pérez-Magaña, 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 de agua para regadío (Martínez, 2003), puesto que la zona utilizada para la experimentación no había sido utilizada para la agricultura 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 (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, Kitchen, Bollero, Bullock y Wiebold, 2003; Bañuelos, Pasakdee, Benes y Ledbetter, 2007; Schroder, Zhang, Zhou, Basta, Raun, Payton y Zazulak, 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 obtenido 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 adecuados (Molina y Meléndez, 2002), siendo aptos para el cultivo (Garrido, 1993).

4.2. Biosólidos

Las concentraciones máximas permitidas para los metales pesados en los biosólidos, específicas para diferentes países, se presentan en la tabla 6. 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 los valores no sobrepasan lo establecido en las normas de otros países y regiones.

Tabla 6. Valores máximos de metales pesados permitidos en biosólidos

METAL PESADO (mg/kg)							
-	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni	Zn
PAÍS							
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 el biosólido de la PTAR Rafey posee valores óptimos y clasificados en la categoría A, según la Norma Mexicana (NOM-004-SEMARNAT, 2002) y las normas de la USEPA (1994). En este sentido, ningún de los dos análisis ha proporcionado valores importantes de sustancias tóxicas.

El COT es muy alto y óptimo para el cultivo, si bien, se recomienda controlar los valores, puesto que cantidades muy elevadas de COT pueden 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 (Andrades y Martínez, 2014), si bien, para ello deben estar cerca de las raíces (Garrido, 1993).

Ningunos de los valores obtenidos representan un exceso para la planta 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 superiores a los 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 6). 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). El contenido de humedad del biosólido utilizado para la primera cosecha fue del 74,7 %, y para la segunda cosecha del 57,3 %. Con las informaciones anteriores se puede indicar que los biosólidos producidos en la PTAR Rafey son óptimos para su aprovechamiento en la agricultura, ya sea como fertilizante o como mejorador de suelos.

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

El objetivo general que perseguía este estudio era analizar las características de los biosólidos producidos en la PTAR Rafey, así como determinar el potencial aprovechable de dichos biosólidos a partir de sus características físicas, químicas y microbiológicas. Además, se buscaba establecer la clasificación para el aprovechamiento agrícola de los biosólidos en el cultivo de maíz.

En este sentido, se ha verificado que el biosólido generado en la PTAR Rafey presenta características apropiadas para su utilización en la agricultura. 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. También, se ha observado que, de las técnicas de aplicación del biosólido utilizadas, las que presentan un mayor redimiento del cultivo son la técnica incorporado pre-siembra (bloque V) y la técnica incorporado post-siembra (bloque III), si bien, solamente se han encontrado diferencias significativas, respecto a los demás tratamientos, en el diámetro del tallo, en la altura de la planta y en la cantidad de granos de maíz.

Los biosólidos producidos en la PTAR Rafey, utilizados como fertilizantes en el cultivo del maíz, han generado mejores resultados que el fertilizante químico utilizado en la experimentación, si bien, los análisis estadísticos realizados han concluido que son diferencias poco significativas. Siguiendo las normas de la USEPA (1994) y la NOM-004-SEMARNAT (2002), el biosólido generado en la PTAR Rafey presenta unas características que lo clasifican como tipo A, es decir, de calidad excelente para la agricultura.

La principal contribución de este estudio es que el biosólido producido en la PTAR Rafey genera resultados óptimos en el cultivo de maíz; en este sentido, el biosólido tiene un costo muy económico frente a los fertilizantes químicos. De esta forma, 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, CORAASAN puede fomentar el uso del biosólido en la agricultura, ayudando esto a reducir la inversión pública para el transporte y la disposición irracional de los mismos.

Aunque se ha verificado que los lodos deshidratados 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.

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 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. 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.

Por último, dado el crecimiento de ciudades como Santiago de los Caballeros y Santo Domingo, 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.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha podido realizar gracias al apoyo financiero y técnico del Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología de la República Dominicana; de CORAASAN y de la Universidad Tecnológica de Santiago. Los autores desean agradecer la disposición y colaboración de estas instituciones.

BIBLIOGRAFÍA

- 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.
- 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.
- Ashekuzzaman, S.M., Forrestal, P., Richards, K., & Fenton, O. (2019). Dairy industry derived wastewater treatment sludge: Generation, type and characterization of nutrients and metals for agricultural reuse. *Journal of Cleaner Production*, 230, 1266-1275.
- Banco Mundial (1999). *Que desperdicio: gestión de residuos sólidos en Asia*. Washington DC, Estados Unidos: Banco Mundial.

- Bañuelos, 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.
- Collivignarelli, M.C., Canato, M., Abba, A., & Miino, M.C. (2019). Biosolids: What are the different types of reuse?. *Journal of Cleaner Production*, 238, 1-21.
- Garrido Valero, M.S. (1993). *Interpretación de análisis de suelos*. Madrid, España: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- 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.
- Hassan, M.N. (2000). *Policies to improve solid waste management in developing countries: some insights in Southeast Asian Countries*. Selangor, Malaysia: University Putra Malaysia.
- Healy, M.G., Fenton, O., Forrestal, P.J., Danaher, M., Brennan, R.B., & Morrison, L. (2016). Metal concentrations in lime stabilised, thermally dried and anaerobically digested sewage sludges. *Waste Management*, 48, 404-408.
- Hornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). What a waste: a global review of solid waste management. *Urban Development Series Knowledge Papers*, 15, 1–98.
- Impellitteri, C.A., Harmon, S., Silva, R.G., Miller, B.W., Scheckel, K.G., Luxton, T.P., ... & Panguluri, S. (2013). Transformation of silver nanoparticles in fresh, aged, and incinerated biosolids. *Water Research*, 47(12), 3878-3886.
- Latare, A.M., Kumar, O., Singh, S.K., & Gupta, A. (2014). Direct and residual effect of sewage sludge on yield, heavy metals content and soil fertility under rice–wheat system. *Ecological Engineering*, 69, 17-24.
- López Galán, E., & Miñano Fernández, F. (1988). *Métodos rápidos de análisis de suelos*. Madrid, España: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Luo, Y., Guo, W., Ngo, H.H., Nghiem, L.D., Hai, F.I., Zhang, J., & Wang, X.C. (2014). A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 473, 619-641.

- 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*. Santo Domingo, República Dominicana: Ministerio de Agricultura.
- Marguí, E., Iglesias, M., Camps, F., Sala, L., & Hidalgo, M. (2016). Long-term use of biosolids as organic fertilizers in agricultural soils: potentially toxic elements occurrence and mobility. *Environmental Science and Pollution Research*, 23 (5), 4454-4464.
- Mattana, S., Petrovičová, B., Landi, L., Gelsomino, A., Cortés, P., Ortiz, O., & Renella, G. (2014). Sewage sludge processing determines its impact on soil microbial community structure and function. *Applied soil ecology*, 75, 150-161.
- Mehrotra, A., Kundu, K., & Sreerishnan, T.R. (2016). Decontamination of heavy metal laden sewage sludge with simultaneous solids reduction using thermophilic sulfur and ferrous oxidizing species. *Journal of Environmental Management*, 167, 228-235.
- 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.
- Mtshali, J.S., Tiruneh, A.T., & Fadiran, A.O. (2014). Characterization of sewage sludge generated from wastewater treatment plants in Swaziland in relation to agricultural uses. *Resources and Environment*, 4 (4), 190-199.
- NOM-004-SEMARNAT (2002). *Norma de Protección Ambiental – Lodos y Biosólidos*. Ciudad de México, México: Normas Oficiales Mexicanas.
- Pérez Cebrián, A. (2016). *Estudio bibliográfico del uso de lodos de depuradora en suelos agrícolas*. Gandía, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- 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.

Sánchez-Monedero, M.A., Mondini, C., De Nobili, M., Leita, L., & Roig, A. (2004). Land application of biosolids. Soil response to different stabilization degree of the treated organic matter. *Waste Management*, 24 (4), 325-332.

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.

Silva, J., Torres, P., & Madera, C. (2008). Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 26 (2), 347-359.

Shargil, D., Gerstl, Z., Fine, P., Nitsan, I., & Kurtzman, D. (2015). Impact of biosolids and wastewater effluent application to agricultural land on steroidal hormone content in lettuce plants. *Science of the Total Environment*, 505, 357-366.

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.

Singh, R.P., & Agrawal, M. (2007). Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of Beta vulgaris plants. *Chemosphere*, 67 (11), 2229-2240.

Singh, R.P., Sharma, B., Sarkar, A., Sengupta, C., Singh, P., & Ibrahim, M.H. (2014). Biological responses of agricultural soils to fly-ash amendment. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 232, 45-60.

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.

Türkdoğan, M.K., Kilicel, F., Kara, K., Tuncer, I., & Uygan, I. (2003). Heavy metals in soil, vegetables and fruits in the endemic upper gastrointestinal cancer region of Turkey. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 13 (3), 175-179.

Ukwatta, A., Mohajerani, A., Eshtiaghi, N., & Setunge, S. (2016). Variation in physical and mechanical properties of fired-clay bricks incorporating ETP biosolids. *Journal of Cleaner Production*, 119, 76-85.

USEPA (1994). *A Plain English Guide to the USEPA, Part503 Biosolids Rule*. Washington, DC, United States: US Environmental Protection Agency.

Vaish, B., Srivastava, V., Singh, P., Singh, A., Singh, P.K., & Singh, R.P. (2016). Exploring untapped energy potential of urban solid waste. *Energy, Ecology and Environment*, 1 (5), 323-342.

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.
