

Evaluación del contenido de metales pesados y parámetros físico-químicos en lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Celendín-Cajamarca

Evaluation of heavy metal content and physicochemical parameters in sludge from the wastewater treatment plant of the city of Celendín-Cajamarca

José Ramiro Díaz Cumpén^{1*}, Giovana Ernestina Chávez Horna¹, Luis Javier Quipuscoa Castro¹, José Francisco Rabanal Guevara¹, Teresita de Jesús Pereyra Quevedo¹

¹Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cajamarca, Av. Atahualpa 1050, C.P. 06003, Cajamarca, Perú

*Autor de correspondencia: rdiazcu@unc.edu.pe

Resumen

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo principal determinar la calidad de los lodos de la PTAR de la ciudad de Celendín, en atención al D.S. 015-2017-Vivienda, que establece valores máximos en diferentes parámetros físico, químico y biológicos, para que este material orgánico pueda ser aprovechado en la fertilización y mejoramiento de suelos; dentro de ello se determinó la concentración del metaloide arsénico y los metales pesados Cd, Cr, Cu, Pb, Ni y Zn, pH, materia orgánica; presencia de *E. coli*, *Salmonella* y huevos de helmintos; así como nitrógeno total; asimismo, se evaluaron otros parámetros como, carbonatos de calcio, conductividad eléctrica, y otros elementos nutritivos como fósforo y potasio; con la finalidad de determinar el nivel de toxicidad del biosólido, potencial fertilizante e higienización, considerando su potencial fertilizante y mejorador de suelos. Los resultados promedio obtenidos para los diferentes parámetros, fue como sigue: de pH (7,2), materia orgánica (20 %), conductividad eléctrica (393,5 mS/m), carbonatos de calcio (14,6 %); en cuanto a las concentraciones de metales pesados encontradas en los lodos fue como sigue: Arsénico (1,54 m.kg⁻¹), cadmio (1,79 m.kg⁻¹), cromo 22,41 m.kg⁻¹, cobre (61,28 m.kg⁻¹), níquel (8,6 m.kg⁻¹), plomo (17,93 m.kg⁻¹), zinc (602,52 m.kg⁻¹); *E. coli* (383,95 NMP/1gST), *Salmonella* sp (1,144 NMP/1gST) y huevos de helmintos (cero). Estos resultados de los análisis de los lodos se evaluaron e interpretaron de acuerdo a la normativa nacional vigente D.S. 015-2017-Vivienda, donde se aprecia que el valor promedio de *Salmonella* sp (1,144 NMP/1gST), supera ligeramente el valor de la normativa (1 NMP/10 g sólidos totales); concluyendo que los lodos son calificados como biosólido A, siendo aptos para su aprovechamiento en agricultura y/o mejoramiento de suelos; asimismo cabe señalar que el lodo de la PTAR Celendín contiene niveles satisfactorios de los macronutrientes nitrógeno, fósforo y potasio, siendo apropiado para su uso como mejorador físico químico y biológico de suelos agrícolas.

Palabras clave: lodos de depuradora, metales pesados en lodos, reaprovechamiento de lodos

Abstract

The main objective of this research work was to determine the quality of the sludge from the WWTP of the city of Celendín, in response to the D.S. 015-2017-Housing, which establishes maximum values in different physical, chemical and biological parameters, so that this organic material can be used in the fertilization and improvement of soils; Within this, the concentration of the metalloid arsenic and the heavy metals Cd, Cr, Cu, Pb, Ni and Zn, pH, and organic matter were determined; presence of *E. coli*, *Salmonella* and helminth eggs; as well as total nitrogen; Likewise, other parameters were evaluated such as calcium carbonates, electrical conductivity, and other nutritional elements such as phosphorus and potassium; with the purpose of determining the level of toxicity of the biosolid, fertilizer potential and sanitation, considering its fertilizer and soil improver potential. The average results obtained for the different parameters were as follows: pH (7,2), organic matter (20 %), electrical conductivity (393,5 mS/m), calcium carbonates (14,6 %); Regarding the concentrations of heavy metals found in the sludge, it was as follows: Arsenic (1,54 m.kg-1), cadmium (1,79 m.kg-1), chromium 22,41 m.kg-1, copper (61,28 m.kg-1 -1), nickel (8,6 m.kg-1), lead (17,93 m.kg-1), zinc (602,52 m.kg-1); *E. coli* (383,95 NMP/1gST), *Salmonella* sp (1,144 NMP/1gST) and helminth eggs (zero). These sludge analysis results were evaluated and interpreted in accordance with current national regulations D.S. 015-2017-Housing, where it is seen that the average value of *Salmonella* sp (1,144 NMP/1gST), slightly exceeds the value of the regulations (1 NMP/10 g total solids); concluding that the sludge is classified as biosolid A, being suitable for use in agriculture and/or soil improvement; It should also be noted that the sludge from the Celendín WWTP contains satisfactory levels of the macronutrients nitrogen, phosphorus and potassium, being appropriate for use as a physical, chemical and biological improver of agricultural soils.

Key words: sewage sludge, heavy metals in sludge, sludge reuse, sludge reuse

Introducción

Se reconoce una problemática ambiental en torno a la generación de lodos por las Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), considerando que es un material orgánico muy solicitado por los agricultores para fertilizar y mejorar sus suelos que necesitan de la reposición de nutrientes por la producción de cultivos; lo cual pone en riesgo la calidad de estos suelos, aguas, productos cosechados y la salud de las personas, ya que se aplican sin conocer la calidad de estos lodos, por lo que es conveniente conocer sus características físico, químicas y biológicas; sin embargo existe una normativa que regula su uso, se trata del D.S. 015-2017-Vivienda, que pone valores límites al contenido de metales pesados, materia orgánica, nitrógeno y contenido máximo de bacterias del tipo *E. coli* y *Salmonella*; así como de huevos de helmintos.

Considerando que en la localidad de Celendín-Cajamarca se tiene a una PTAR que genera trimestralmente entre 18 a 22,5 t de lodo residual, existe la preocupación de gestionar estos materiales, los cuales por tener un gran potencial fertilizante son requeridos por los agricultores de la zona, siendo aplicados a sus suelos sin mayor información de los mismos en cuanto a los parámetros exigidos por la normativa citada; por lo que se investigaron los lodos generados por esta PTAR para brindar un uso seguro y no provocar una mayor contaminación de los

suelos que ya son afectados por el uso indiscriminado de insumos agrícolas de origen sintético como son los pesticidas (insecticidas y funguicidas) y los fertilizantes químicos, que también pueden salinizar los suelos y contaminar las aguas. Esta problemática fue la que nos llevó a formular la hipótesis de que estos lodos superaban los valores establecidos por el D.S. 015-2017 Vivienda, la cual fue contrastada a través de una metodología que incluyó muestreos y análisis de los lodos en mención para conocer los niveles de materia orgánica, metales pesados, nitrógeno total, bacterias y parásitos, para brindar un uso seguro de este producto sobre suelos pobres, degradados o como ingrediente en la elaboración de algún fertilizante orgánico como compost, biol, etc.

Por lo tanto, el presente trabajo de investigación tuvo como objetivo principal determinar la concentración del metaloide arsénico (As) y los metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), plomo (Pb), Niquel (Ni) y zinc (Zn), pH, materia orgánica; presencia de *E. coli*, *Salmonella* y huevos de helmintos; así como nitrógeno total; asimismo, se evaluaron otros parámetros como, carbonatos de calcio, conductividad eléctrica, y otros elementos nutritivos como fósforo y potasio; con la finalidad de determinar el nivel de toxicidad del biosólido por su contenido en metales pesados, considerando que éstos se caracterizan por ser los bioacumulables y no biodegradables, potencial fertilizante e higienización, considerando su potencial fertilizante y mejorador de suelos de los lodos generados por la PTAR Celendín.

Como resultados de la investigación, se ha podido encontrar que estos lodos no superaban los estándares para metales pesados, materia orgánica, nitrógeno total, *E. coli*, *Salmonella* y huevos de helmintos contemplados en el D.S. 015-2017-Vivienda; pudiendo ser declarados como aptos para su uso agrícola sin restricciones; sin embargo la misma presencia de los metales evaluados en diferentes concentraciones ya es motivo de preocupación por no ser biodegradables y más bien bioacumulables a través de la cadena trófica.

Materiales y métodos

En base a los objetivos propuestos, en primer lugar se hizo el reconocimiento de la Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la ciudad de Celendín, (Figura 1) y la Planta de secado de lodos (Figura 2); así como de los lechos de lodos de la PTAR (Figura 3).

El trabajo de investigación a nivel de campo se inició con la identificación de los puntos de muestreo en los lechos de secado del lodo de la PTAR Celendín; que cumplan ciertos requisitos para obtener la mayor homogeneidad de la muestra; establecer la frecuencia de muestreo, con la finalidad de obtener muestras que pueden haber variado por las condiciones climáticas, así como realizar el muestreo, recoger información de campo y realizar los análisis de laboratorio de los diferentes parámetros físico, químicos y biológicos exigidos por el D.S. N° 015-2017-Vivienda y finalmente realizar la interpretación y evaluación de los resultados obtenidos, que permitirán recomendar o no el uso de este producto, en favor de las actividades agrícolas, como fertilizante orgánico.

En cada lecho de secado elegido, se obtuvo en forma aleatoria un total de 10 muestras simples para conformar una muestra compuesta. El muestreo indicado se realizó en dos oportunidades, en época de estiaje (sin lluvias) y

en temporada lluviosa, con la finalidad de evaluar la incidencia de la ausencia o presencia de lluvias en la concentración de los contaminantes y nutrientes señalados.

El lodo seco al aire, se mezcló en forma homogénea, separando dos kilos por cada muestra compuesta, las cuales fueron colocados en bolsas plásticas de cierre hermético, selladas con cinta adhesiva, identificadas (etiquetadas) y colocadas en un cooler; de esta forma fueron enviadas a 2 laboratorios certificados por INACAL (SGS e INIA). La etapa de laboratorio permitió determinar la concentración de los metales pesados en el lodo evaluado: arsénico (metaloide), cadmio, cromo, cobre, plomo, níquel y zinc; contenido de macronutrientes (NPK): nitrógeno, fósforo y potasio; valores de parámetros físicos químicos y biológicos: potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), materia orgánica, carbonato de calcio, *E. coli*, *Salmonella sp.* y huevos de helmintos; finalmente, en la etapa de gabinete los resultados obtenidos, fueron ordenados, evaluados e interpretados en atención al Decreto Supremo N°015-2017-Vivienda y presentados en figuras; para posteriormente determinar el cumplimiento de la normativa vigente en base a los parámetros establecidos por ésta. El tipo de investigación es aplicada, no experimental transversal descriptiva.

El presente trabajo de investigación se realizó en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la ciudad de Celendín, provincia de Celendín departamento de Cajamarca. La PTAR se encuentra ubicada en el barrio Pallac, a una altitud de 2605 msnm; dentro de una latitud (Norte): 9242247, longitud (Este): 855314, temperatura ambiental media: 13 °C, temperatura ambiental máxima promedio: 21 °C, temperatura ambiental mínima promedio: 9 °C y precipitación promedio anual: 818 mm; siendo sus coordenadas UTM: 815436,72 E y 9241974,92 S. La PTAR se encuentra ubicada en la parte baja de la ciudad de Celendín, presenta una topografía relativamente plana (pendiente menor al 10 %), ocupando un área de aproximadamente 3,5 hectáreas, colindando río el Grande y con la zona periurbana de Celendín.



Figura 1. Mapa satelital de la PTAR Celendín-Cajamarca

Fuente: Castro E. (2022)

Resultados y discusión

Para determinar la calidad del lodo obtenido de la PTAR Celendín, se compararon los resultados obtenidos con los parámetros de estabilización, establecidos en el D.S. N°015-2017-Vivienda, para calificar el aprovechamiento de este material orgánico como biosólido clase A; lo cual se ha logrado mediante el análisis de muestras de lodos de esta depuradora en dos oportunidades, coincidentes con la época de ausencia de lluvias (época de estiaje) y la época lluviosa, resultados de los análisis físico, químicos y biológicos que se presentan en el anexo de este informe.

Sobre los parámetros edáficos

pH del lodo de la PTAR Celendín

Según la Figura 2, el pH del lodo de la PTAR Celendín califica como neutro con 7,2; siendo el promedio del valor del pH de la muestra obtenida en época de estiaje (7,0) y el pH de la muestra obtenida en época de lluvias (7,3), lo cual es favorable si se le usa para fertilizar suelos de diferentes valores de pH, porque no afecta a las otras propiedades del suelo; por ejemplo no va a acidificar los suelos a los que aplique; considerando que la mayoría de metales pesados son solubles a pHs ácidos; a excepción del Cr, Mo, As y Se; bajo lo cual pueden ser absorbidos por las plantas o lixiviados a las aguas subterráneas, causando contaminación de estos recursos; además es un rango de pH conveniente, sobre todo cuando se va a someter a los lodos a procesos de compostaje; considerando que el rango de pH más apropiado para el trabajo de los microorganismos que se encargan de su descomposición y mineralización, es el que se halla comprendido entre 6,5 y 7,5; asimismo se puede señalar que el pH de los lodos muestreados es una repercusión de la baja concentración de carbonato de calcio (Ca CO_3).

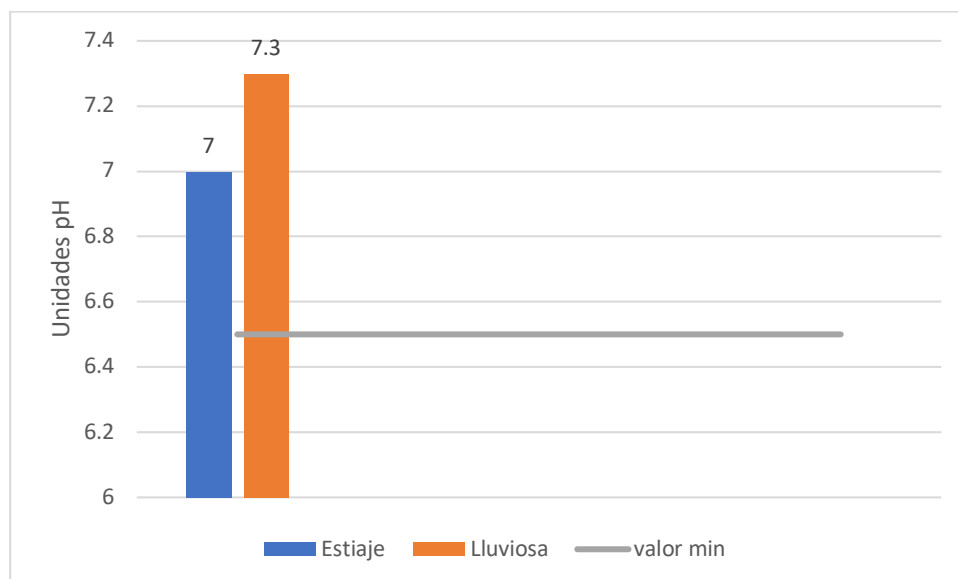


Figura 2. pH de los lodos de la PTAR Celendín en dos épocas

Contenido de materia orgánica (MO) del lodo de la PTAR Celendín

El contenido de materia orgánica de los lodos de la PTAR Celendín, se presenta en la Figura 3, donde se puede apreciar que el porcentaje promedio de los dos muestreos en diferentes épocas es de 20 %; sin embargo se obtuvo el mayor valor en época lluviosa con 28,1 %, lo cual no supera al contenido permisible de este componente establecido por el D.S. 015-2017-Vivienda, valor señalado en menor o igual al 60 %; siendo el valor de este componente un importante aporte para la fertilidad de los suelos que carecen de nutrientes, además de ser mejorador de la estructura y porosidad de este recurso natural y sobre todo ser la fuente de un componente muy importante como es el humus, coloide orgánico, de quien depende mayormente la adsorción de los metales nutrientes y tóxicos que se encuentren en el suelo, evitando de este modo que sean lixiviados a las aguas subterráneas o tomados libremente por las plantas.

Si observamos la clasificación de parámetros edáficos en el Reglamento de Clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor (D.S. 005-2022-MIDAGRI), se considera como nivel alto de MO cuando es mayor al 4 %; lo que quiere decir que se estaría incorporando a los suelos un material con una alta capacidad mejoradora de los mismos.

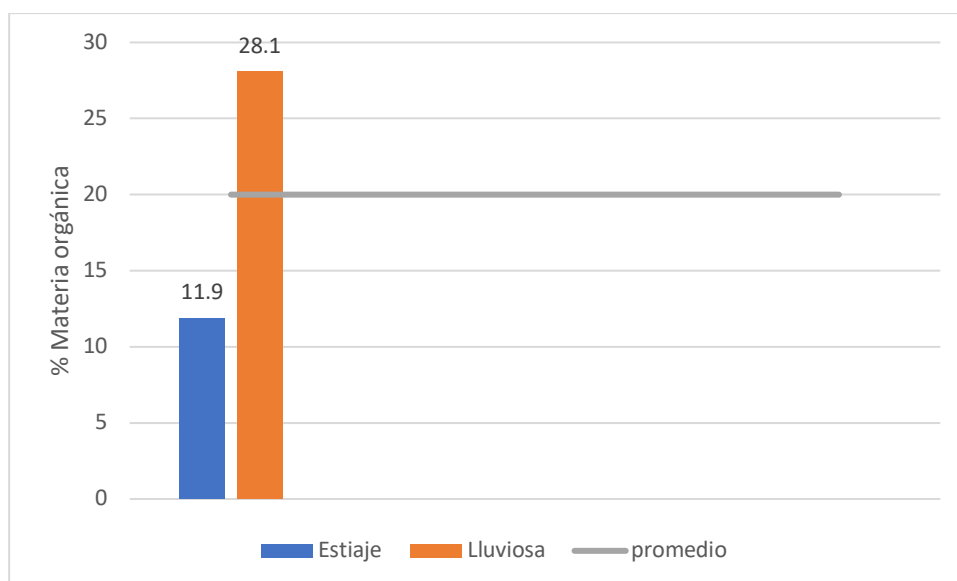


Figura 3. Materia orgánica de los lodos de la PTAR Celendín en dos épocas

Conductividad eléctrica (CE) del lodo de la PTAR Celendín

La CE alcanza un valor promedio de 393,5 ms/m (Figura 4), equivalente a 3,94 dSm⁻¹; siendo el valor más alto, el registrado por la primera muestra de lodo, obtenido en época de estiaje (580 ms/m equivalente a 5,8 dSm⁻¹); lo que significa que el lodo al ser incorporado al suelo bajo cualquier forma de abono orgánico no va a afectar al suelo ni a las plantas o cultivos, ya que si tomamos la calificación de salinidad para suelos (D.S. 005-2022-MIDAGRI) se le calificaría como ligeramente salino.

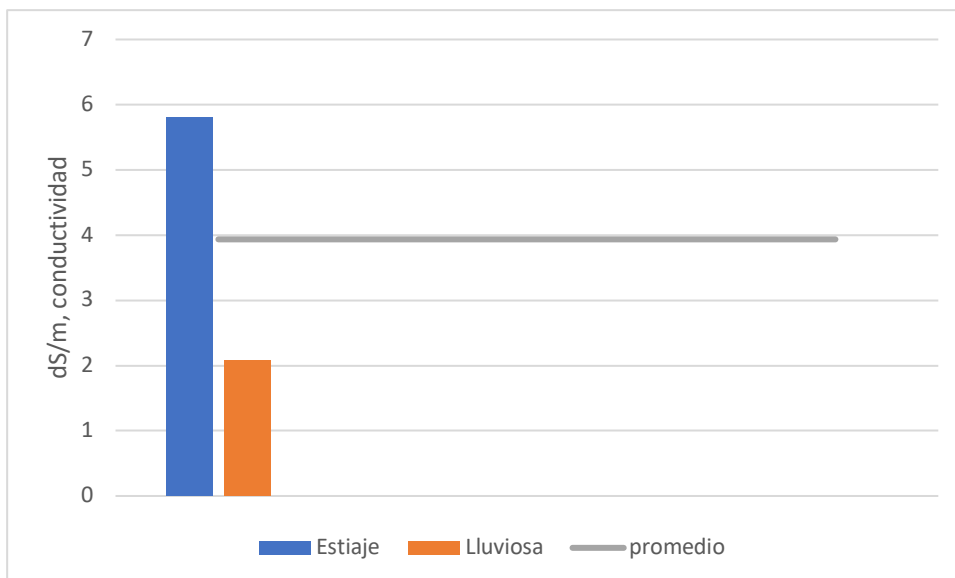


Figura 4. Conductividad eléctrica de los lodos de la PTAR Celendín en dos épocas.

Contenido de carbonato de calcio (CaCO₃) en los lodos analizados de la PTAR-Celendín

El valor promedio de CaCO₃ es 14,6 %, siendo el mayor valor de este componente registrado por la muestra obtenida en la época de lluvias con 17,6 %. Es preciso señalar que este componente influye de manera directa en el pH y en la CE; siendo además importante su aporte de Calcio, considerando dentro de los 6 macronutrientes que más necesita las plantas para cumplir sus funciones vitales (NPK, Ca, Mg y S). Este valor es calificado como un bajo contenido de carbonato de calcio (DS. 05-2022-MIDAGRI); sin embargo, la FAO (2009) lo califica como ligeramente calcáreo; lo que se evidencia en un pH ligeramente alcalino.

Sobre el contenido de metales pesados totales en el lodo de la PTAR-Celendín

Contenido de Arsénico (As) en el lodo de la PTAR Celendín

Según el D.S. N°015-2017- Vivienda, el máximo valor aceptable en un lodo con fines de uso agrícola es de 40 mg. kg⁻¹. Al respecto según se muestra en la Figura 5, el valor más alto fue alcanzado por la primera muestra obtenida en época de estiaje, siendo de 1,78 mg. kg⁻¹, con un promedio de 1,54 mg. kg⁻¹, no excediendo el valor exigido por la norma aludida; siendo apropiado para su aprovechamiento en agricultura como biosólido clase A.

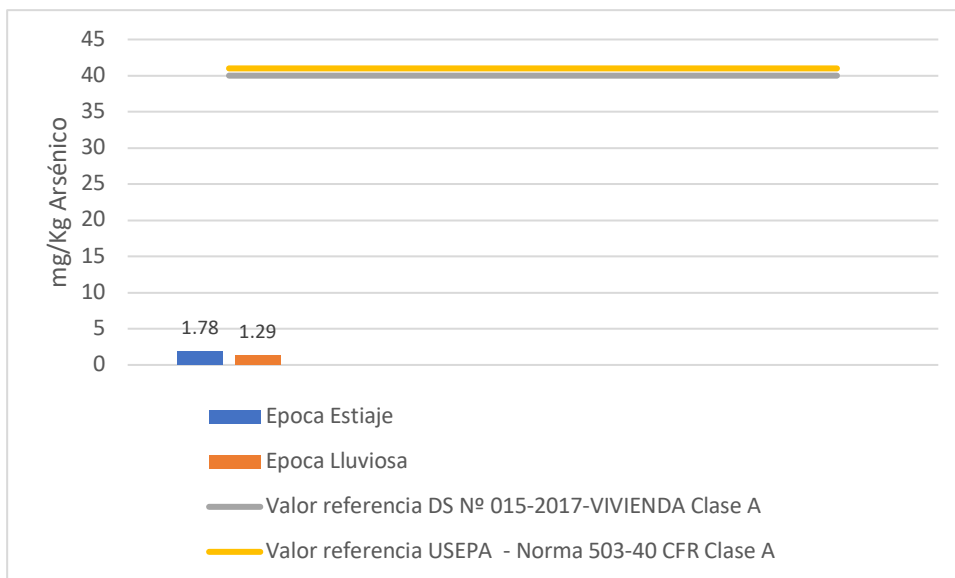


Figura 5. Contenido de Arsénico en los lodos de la PTAR Celendín en dos épocas del año

Contenido de Cadmio (Cd) en el lodo de la PTAR Celendín

De acuerdo al D.S.N°015-2017- Vivienda, el máximo valor aceptable en un lodo con fines de uso agrícola es de 40 mg. kg⁻¹. Según los valores presentados en la Figura 6, el valor más alto de este metal, fue alcanzado por la segunda muestra obtenida en época lluviosa, siendo de 2,33 mg. kg⁻¹, con un promedio de 1,79 mg. kg⁻¹, no superando el valor exigido por la norma aludida; siendo por lo tanto apropiado para su aprovechamiento en agricultura como biosólido clase A.

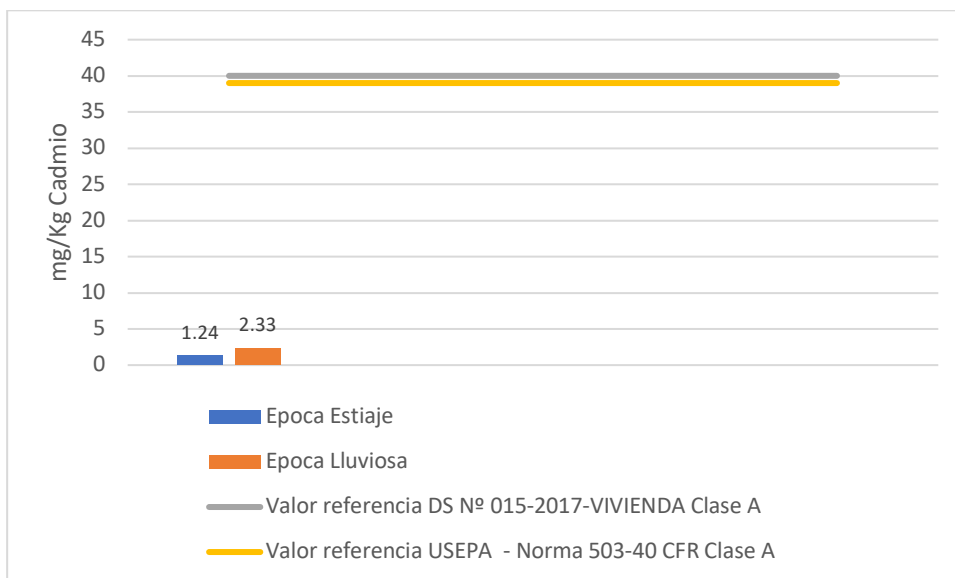


Figura 6. Contenido de Cadmio en los lodos de la PTAR Celendín en dos épocas del año

Contenido de Cromo (Cr) en el lodo de la PTAR Celendín

Según el Decreto Supremo N°015-2017- Vivienda, el máximo valor permitido en un lodo para su aprovechamiento agrícola, es de 1200 mg. kg⁻¹. Según la Figura 7, el valor más alto registrado para este metal, fue alcanzado por la segunda muestra obtenida en época lluviosa, siendo de 26 mg. kg⁻¹, con un promedio de 22,41 mg. kg⁻¹, siendo un valor muy inferior al valor límite; no excediendo por lo tanto el valor exigido por la norma aludida; siendo aprobado para su aprovechamiento en agricultura como biosólido clase A.

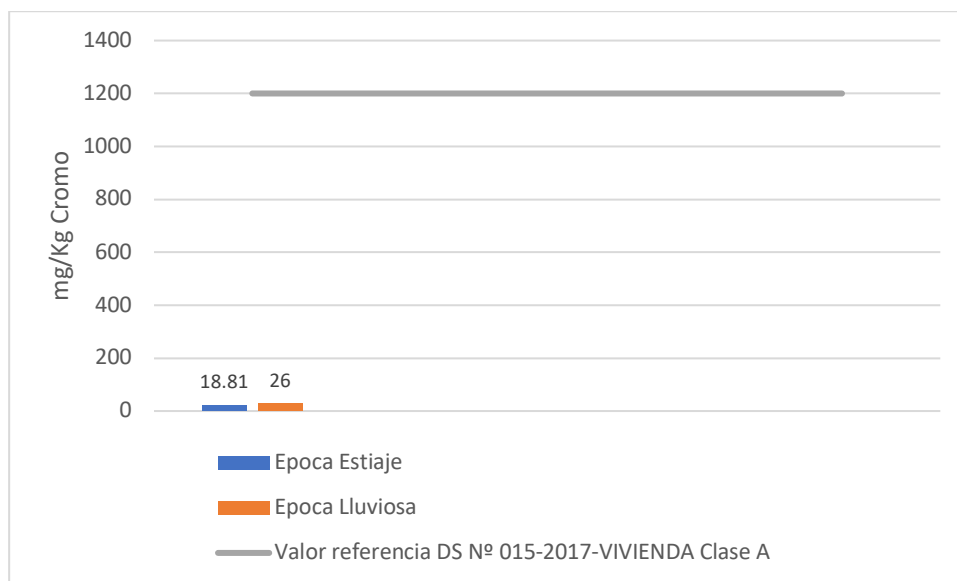


Figura 7. Contenido de Cromo en los lodos de la PTAR Celendín en dos épocas del año

Contenido de Cobre (Cu) en el lodo de la PTAR Celendín

Según el Decreto Supremo N°015-2017- Vivienda, el valor límite indicado en el decreto supremo referido, en un lodo con fines de su uso agrícola, es de 1500 mg. kg⁻¹. Cabe señalar que el valor más alto fue alcanzado por la segunda muestra obtenida en época lluviosa, siendo de 70,1 mg. kg⁻¹, con un promedio de 61,28 mg. kg⁻¹, siendo un valor muy inferior al valor límite establecido para este metal por la norma citada; no excediendo el valor exigido por el señalado decreto supremo; siendo por lo tanto apropiado para su aprovechamiento en agricultura como biosólido clase A (Figura 8).

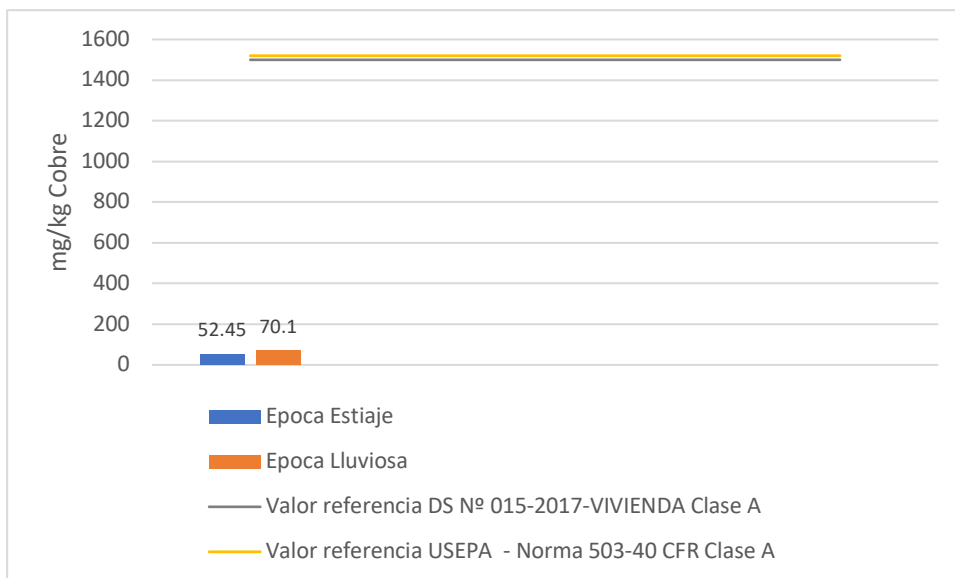


Figura 8. Contenido de Cobre en los lodos de la PTAR Celendín en dos épocas del año

Contenido de Plomo (Pb) en el lodo de la PTAR Celendín

Según el Decreto Supremo N°015-2017- Vivienda, el valor máximo indicado en el decreto supremo referido en un lodo con fines agrícolas es de 400 mg. kg⁻¹. De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 9, el valor más alto registrado fue alcanzado por la segunda muestra obtenida en época lluviosa, siendo de 24,76 mg. kg⁻¹, con un promedio de 17,93 mg. kg⁻¹, siendo en todos los casos, valores de este metal que no superan el valor exigido por la norma aludida; por lo que el lodo analizado se puede usar sin restricciones como insumo de la elaboración de abonos orgánicos muy solicitados para fertilizar suelos con deficiencia de nutrientes para la producción agrícola; siendo calificado como biosólido clase A.

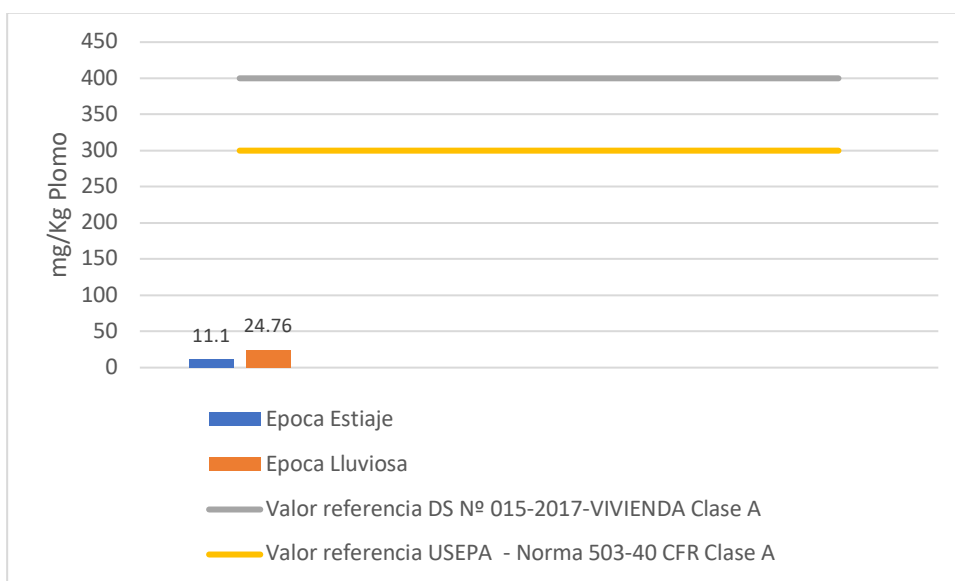


Figura 9. Contenido de Plomo en los lodos de la PTAR Celendín en dos épocas del año

Contenido de Níquel (Ni) en el lodo de la PTAR Celendín

El Decreto Supremo N°015-2017- Vivienda, establece como valor límite para el metal Níquel en un lodo con fines de su aprovechamiento en la fertilización de suelos, un valor de 400 mg. kg⁻¹. Ante lo cual el valor más alto registrado mostrado en la Figura 10, fue alcanzado por la segunda muestra obtenida en época lluviosa, siendo de 8,98 mg. kg⁻¹, con un promedio de 8,6 mg. kg⁻¹, que comparada con el valor máximo de la norma en mención, es muy inferior, no excediendo el valor exigido por la norma aludida; en atención a lo cual este lodo puede ser usado para su conversión en abonos orgánicos tipo compost, bioles, etc. y ser aplicado a suelos de baja fertilidad como los existentes en la provincia de Celendín y alrededores; ya que se estaría calificando de acuerdo a la norma en cuestión como biosólido clase A.

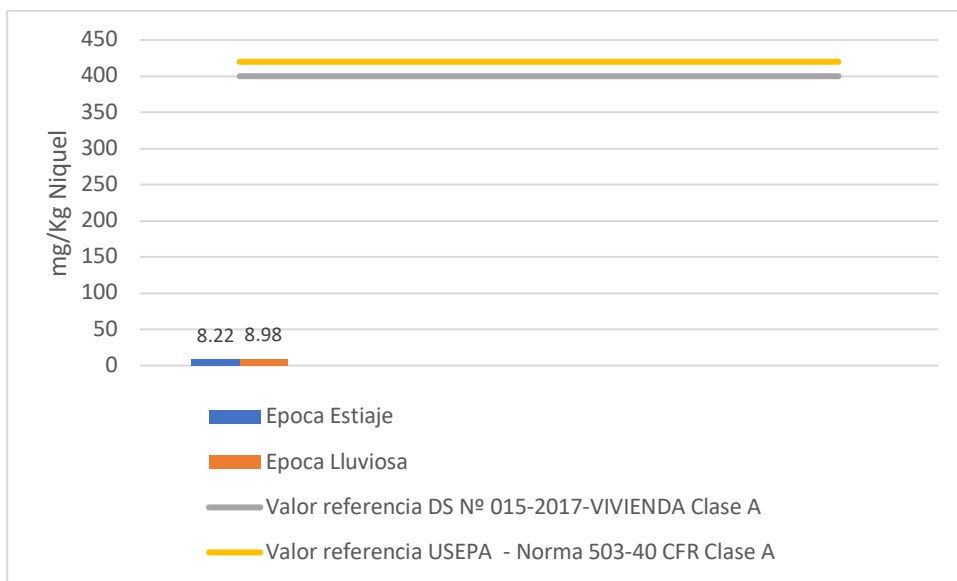


Figura 10. Contenido de Níquel en los lodos de la PTAR Celendín en dos épocas del año

Contenido de Zinc (Zn) en el lodo de la PTAR Celendín.

En atención al D.S. N°015-2017- Vivienda, el valor límite indicado para este metal, para hacer viable el uso de un lodo con fines agrícolas es de 2400 mg. kg⁻¹; ante lo cual al examinar Figura 11, es posible notar que el valor más alto registrado era inferior al valor exigido por la norma en referencia; el cual fue alcanzado por la segunda muestra obtenida en época lluviosa, siendo de 744,73 mg. kg⁻¹ con un promedio de 602,52 mg. kg⁻¹, muy por debajo del valor límite. no superando el valor exigido por la norma aludida; siendo apropiado para su aprovechamiento en agricultura como biosólido clase A.

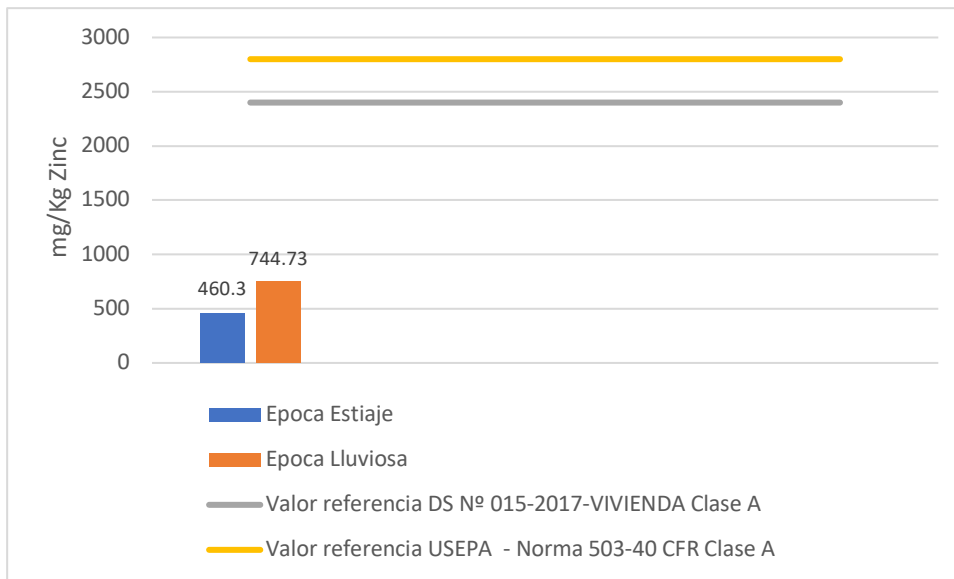


Figura 11. Contenido de Zinc en los lodos de la PTAR Celendín en dos épocas del año

Ninguno de los valores encontrados en el análisis de elementos tóxicos en los lodos de la PTAR-Celendín, superan los valores considerados en el Reglamento para el reaprovechamiento de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, aprobado mediante D.S. N° 2017-Vivienda; para el metaloide Arsénico y los metales, Cadmio, Cromo, Cobre, Plomo, Mercurio, Níquel y zinc.

Asimismo comparados los resultados obtenidos con los contenidos máximos de metales pesados totales permitidos en lodos de depuradoras (PTARs), cuyo destino es su aplicación a suelos agrícolas; según las normativas ambientales de la Unión Europea (Directiva 86/278/EEC (Marmo, 2003); la normativa chilena (Norma lodos Nch2952c -2004 (INN, 2004); éstos no superan los estándares de los países señalados respecto a la calidad de los lodos para uso agrícola; asimismo según la normativa de la USEPA (Norma 503 - 40 CFR/1993 (US EPA, 1993), él único metal que supera los estándares de esta norma es el molibdeno con 127,04 mg.kg⁻¹ sobre 57 mg.kg⁻¹, comparados también con la norma Australiana (Norma Australian Standard AS 4454-1999 (ARMCANZ/ANZECC, 2000), solo el caso del zinc con 602,52 mg.kg⁻¹ se ha superado los estándares de esta norma establecidos en 200 mg.kg⁻¹ (Lodo C1) y 2500 mg.kg⁻¹ (Lodo C2).

En tal sentido de acuerdo a los valores de los metales pesados encontrados, y en correspondencia con el Reglamento aludido, el lodo de la PTAR Celendín se puede calificar como Biosólido Clase A, pudiendo ser usado sin restricciones en la obtención de abonos orgánicos tipo compost, biol, etc. para su uso en la fertilización de suelos agrícolas, además por su valor adicional en nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, hierro y magnesio y otros nutrientes.

Sobre los valores de los macronutrientes nitrógeno, fósforo y potasio obtenidos en el lodo de la PTAR Celendín

El nitrógeno es el elemento más indicado para valorar la calidad de un abono orgánico, porque presenta altas posibilidades de ocasionar daño ambiental por pérdidas de amoníaco (NH_3^+) por volatilización, de nitrato (NO_3^-) por lixiviación y por la presencia de emisiones de óxido nitroso (N_2O) (Figuroa *et al*, 2012 citado por Castro, E. (2022).

Según el D.S. N°015-2017-Vivienda para el aprovechamiento de los lodos como biosólido clase A se debe analizar la concentración de nitrógeno total de manera que en la aplicación no se exceda la tasa máxima de nutrientes en el suelo y así prevenir el exceso de nitrógeno y sus derivados en las fuentes de agua.

En cuanto a los nutrientes (NPK), evaluados en el lodo de la PTAR Celendín, se encontró que el contenido de nitrógeno en el lodo analizado, alcanza su mayor valor en la segunda muestra tomada en época lluviosa, siendo de 17,8 mg.g^{-1} ; con un promedio de 15,4 mg.g^{-1} ; en tanto que el fósforo disponible muestra el mayor valor en la primera muestra obtenida en época seca, siendo de 124,3 mg.kg^{-1} ; asimismo el potasio disponible encontrado en el lodo analizado, alcanza su mayor valor en la muestra tomada en época seca con 653,4 mg.kg^{-1} .

Al no contar con referentes de estos elementos en lodos de PTAR, para calificar los resultados obtenidos, fue necesario acudir a la calificación de estos elementos en suelos; por lo cual se tuvo que recurrir al Reglamento de clasificación de tierra por su capacidad de uso mayor (DS. 005-2022-MIDAGRI); en atención a lo cual, ambos macronutrientes evaluados estarían dentro de un nivel alto, lo cual resulta beneficioso para los suelos que se fertilizarían con este material orgánico.

Según la norma aludida, cuando en un suelo la materia orgánica, el fósforo y/o potasio son altos, se asegura que el suelo va a tener una fertilidad alta, lo cual se podría conseguir con la aplicación de este lodo a los suelos deficientes en estos elementos (Figuras 12, 13 y 14).

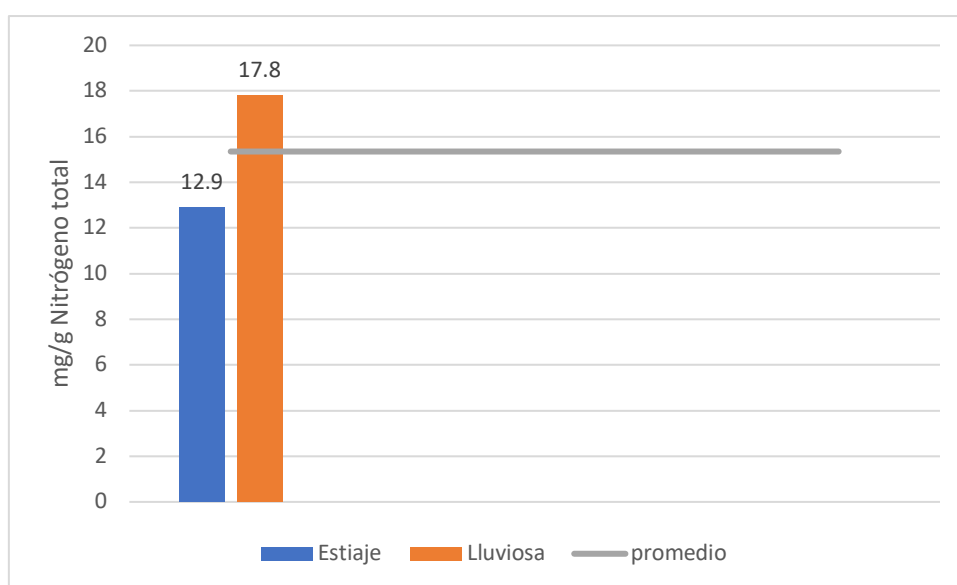


Figura 12. Nitrógeno total en los lodos de la PTAR Celendín en dos épocas

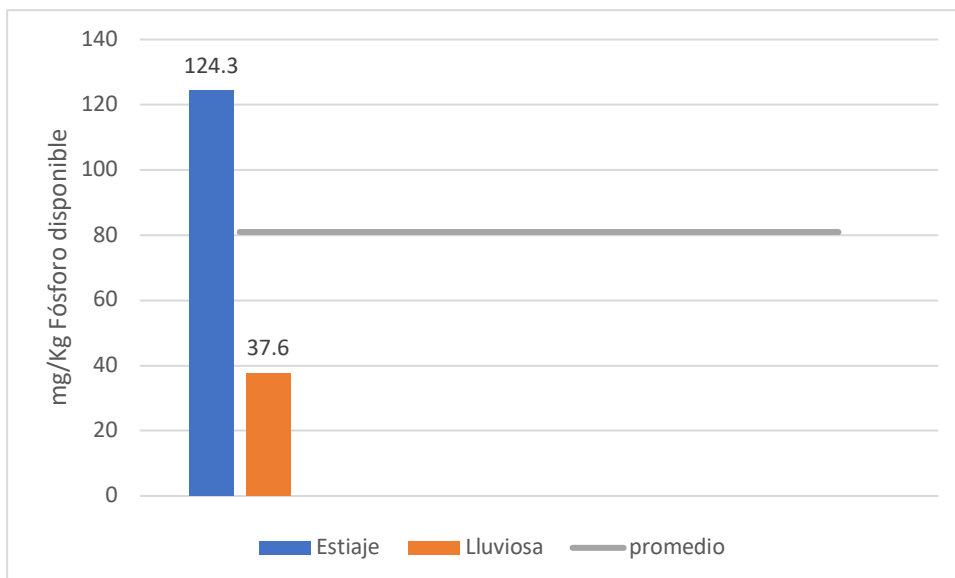


Figura 13. Fósforo total en los lodos de la PTAR Celendín en dos épocas

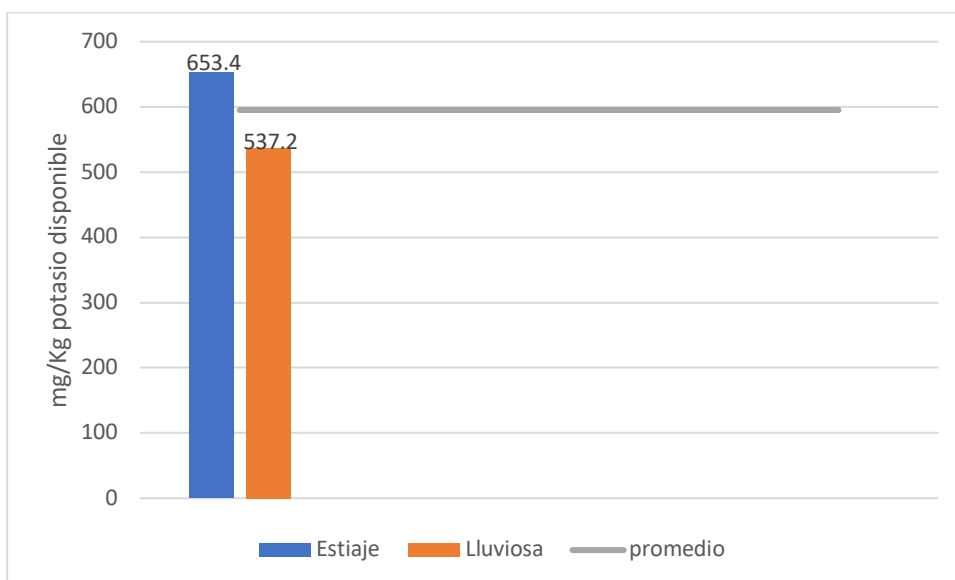


Figura 14. Potasio total en los lodos de la PTAR Celendín en dos épocas

Sobre los Parámetros de higienización

Indicadores de contaminación fecal

Según el DS 015 – 2017 – Vivienda, los indicadores de contaminación fecal en lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales son las bacterias *Escherichia coli* (< 1000 NMP/1g sólidos totales) y *Salmonella* spp (< 1 NMP/ 10g sólidos totales), es posible cumplir con este indicador, solo cumpliendo con uno de estos indicadores; también como alternativa para el indicador de contaminación fecal *Escherichia coli* se puede autorizar la utilización del parámetro de Bacterias Termotolerantes < 1000 NMP/ 1g ST, en caso de ser necesario, coincidiendo con EPA 2002. para coliformes fecales inferior a 1000 NMP por gramo de sólidos totales o la densidad de *Salmonella* sp. es inferior a 3 NMP por 4 gramos de sólidos totales.

Escherichia coli

Las bacterias coliformes incluyen los géneros *Escherichia* y *Aerobacter*. El uso de 105 coliformes como organismos indicadores es problemático debido a que la *Aerobacter* y ciertas clases de *Escherichia* pueden crecer en el suelo; por lo tanto, la presencia de coliformes no siempre es sinónimo de contaminación con residuos humanos; no obstante, aunque parece ser que las *Escherichia coli* si son de origen exclusivamente fecal.

Los resultados mostrados en la Figura 15, indican que la concentración del indicador de contaminación fecal *Escherichia coli* es menor al límite de cuantificación (< 0,2 NMP/ 1g de sólidos totales) para la época de estiaje, pudiendo deberse a que en el momento del muestreo el lodo había alcanzado alta deshidratación y exposición a factores de aireación e inactivación bacterial; en tanto, para la época lluviosa el valor es 767,7 NMP/ 1g de sólidos totales, debido a que, el lodo se encontraba más acuoso y fresco; donde las bacterias fecales como *Escherichia coli* presentaba mayores concentraciones, sin embargo, para ambos muestreos realizados los valores son inferiores a 1000 NMP / 1g de sólidos totales, valores que lo clasificarían como de calidad Clase A (aquellos aplicables al suelo sin restricciones sanitarias, DS N° 015-2017-VIVIENDA) para este indicador.

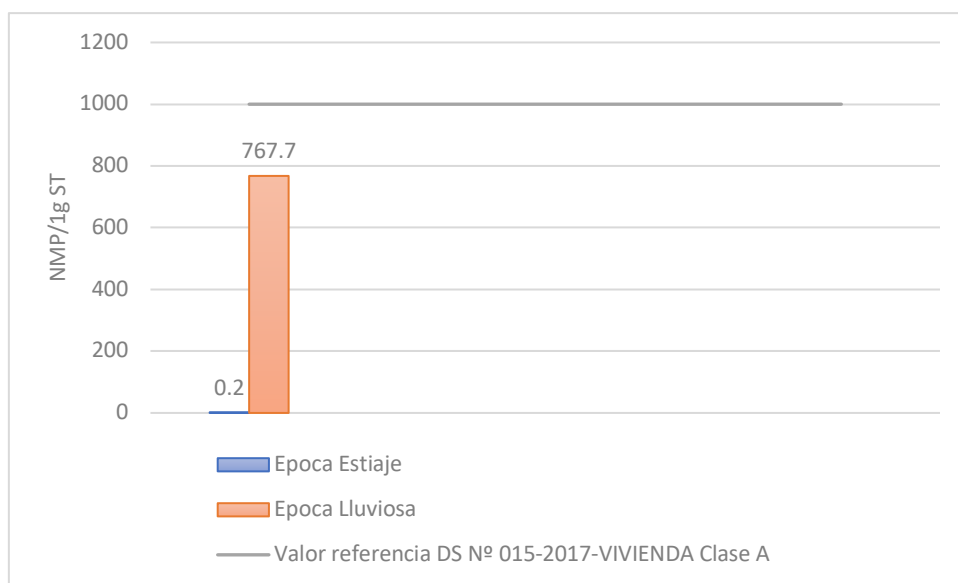


Figura 15. Concentración de *Escherichia coli* en lodos de la PTAR Celendín

Salmonella spp.

Salmonella es una bacteria que provoca la infección llamada salmonelosis, siendo una de las cuatro principales causas de enfermedades diarreicas a nivel mundial. Su presencia y prevalencia es un riesgo permanente para la contaminación de alimentos, además repercute en problemas de salud de las personas, lo cual se ve reflejado en una alta incidencia de brotes diarreicos e intoxicaciones, debido al uso del agua en operaciones agrícolas y de uso y consumo humano, así como, el uso lodos de depuradoras en la agricultura. La bacteria puede sobrevivir varios meses en agua y también es muy resistente a baja actividad de agua, por lo que puede sobrevivir varias semanas en un ambiente seco (OMS, 2018).

La Figura 16 presenta los hallazgos obtenidos en muestras de lodos de la PTAR Celendín para dos periodos de muestreo, el primero en época seca (estiaje), la concentración es relativamente baja menor a 0,6 NMP/10 g de sólidos totales, y cumple con los valores del DS 015-2017. Vivienda (< 1 NMP/10 g de ST); por tanto, clasificaría como biosólido clase A; es necesario indicar, que el lodo se encontraba deshidratado (aparentemente seco), debido a su permanencia en los lechos de secado de lodos de la PTAR, factores como la aireación, falta de humedad podrían haber favorecido la inactivación de estas bacterias; mientras que, en la muestra del periodo lluvioso, el valor obtenido es < 1,6 NMP/10 g de sólidos totales, valor que no cumple con el indicador de contaminación fecal del DS 015-2017. Vivienda (< 1 NMP/10 g de ST), esta muestra se encontraba fresca con alto contenido de humedad, factores que permitieron su existencia de la bacteria en el lodo; coincidiendo con la OMS. 2018, que señala que la *Salmonella* spp., puede estar presente en ambiente húmedos por varios meses y algunas semanas en ambientes secos.

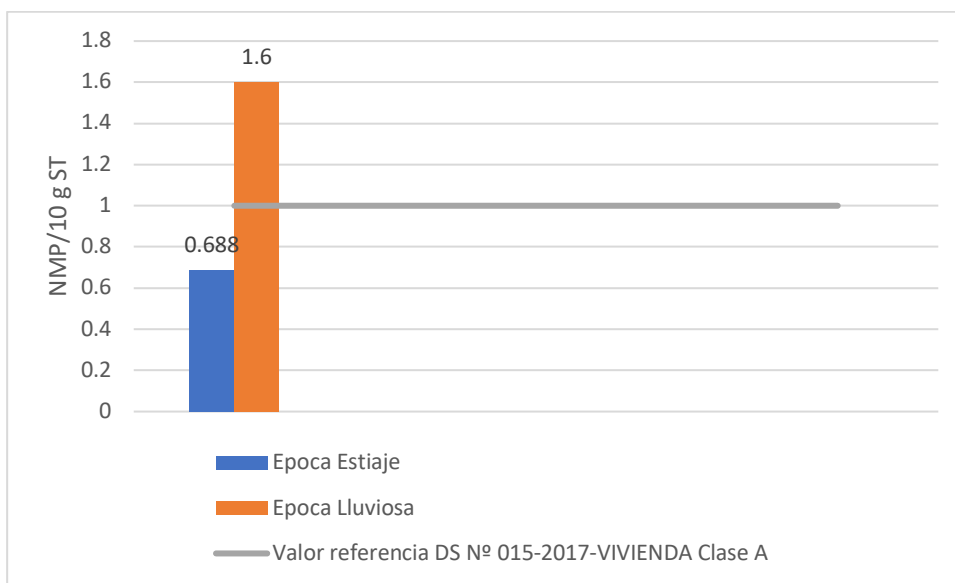


Figura 16. Concentración de *Salmonella* spp. en lodos de la PTAR Celendín

Concentración de huevos de helmintos

Los huevos de helmintos se encuentran en el ambiente y son de gran importancia en salud pública, debido a su mínima dosis infectiva y a su alta resistencia a diversas condiciones ambientales, como la temperatura, el pH y la humedad, así como a la desinfección con cloro. Se los utiliza, asimismo, como indicadores de la presencia de parásitos por contaminación fecal en aguas residuales tratadas, y en lodos y biosólidos generados por sistemas de tratamiento. Los géneros más predominantes son *Ascaris*, *Trichuris*, *Ancylostoma* e *Hymenolepis* (WHO, 2006).

En las muestras del lodo de la PTAR Celendín (Figura 17), tanto para el periodo de estiaje y lluvioso, no se registraron huevos de estos parásitos, obteniendo cero huevos de helmintos por cada 4g de sólidos totales, lo que implica que cumple como un lodo de clase A, y puede ser usado sin restricciones. Según DS 015 – 2017 – Vivienda, coincidiendo el mismo, con los valores de la OMS 2002.

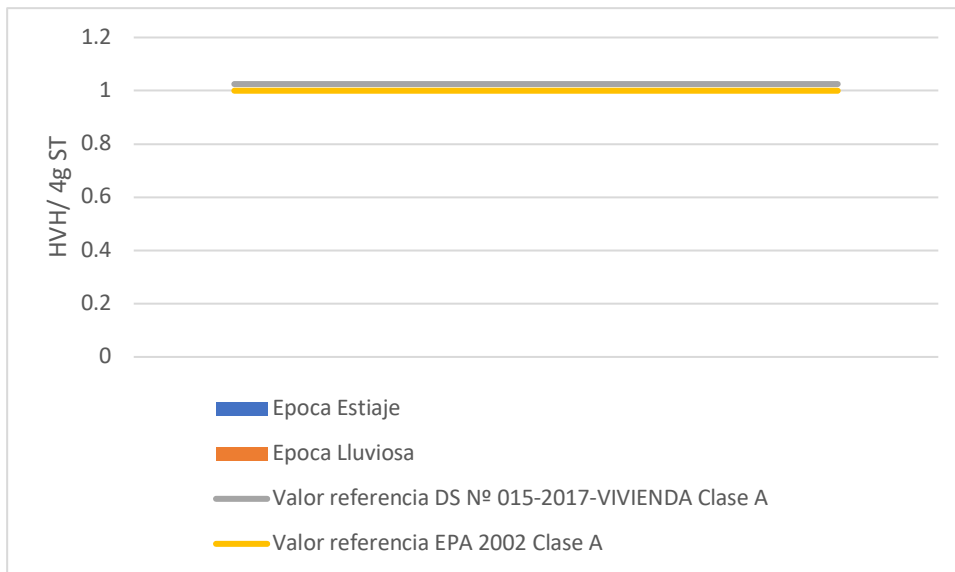


Figura 17. Concentración de huevos de helmintos en el lodo de la PTAR Celendín

Conclusiones

En cuanto a los parámetros de toxicidad química en biosólidos (concentración de metales pesados), el lodo de la PTAR Celendín cumple con los parámetros exigidos en el D.S. N°015-2017-Vivienda; siendo calificado como un biosólido clase A, apto para su aprovechamiento en agricultura y/o mejoramiento de suelos, presentando los siguientes valores: 1,54 mg.kg⁻¹ de As, 1,79 mg.kg⁻¹ de Cd, 22,41 mg.kg⁻¹ de Cr, 61,28 mg.kg⁻¹ de Cu, 8,6 mg.kg⁻¹ de Ni, 17,93 mg.kg⁻¹ de Pb, 602,52 mg.kg⁻¹ de Zn.

De acuerdo al parámetro de estabilización (Materia orgánica) exigido por el D.S. N°015-2017-Vivienda, establecido en menor o igual al 60 % de materia seca, el resultado obtenido al ser de 20 % de MO en promedio, no lo supera; siendo por lo tanto calificado como un biosólido clase A para su uso agrícola sin restricciones.

El lodo de la PTAR Celendín contiene niveles satisfactorios de los macronutrientes nitrógeno, fósforo y potasio, siendo apropiado para su uso como mejorador físico químico y biológico de suelos agrícolas.

La calidad biológica de los biosólidos de PTAR Celendín lo califica como clase A según el DS N°015-2017-Vivienda, cumpliendo con todos los parámetros de higienización para época de estiaje (lodos deshidratados); sin embargo, en época lluviosa (lodos húmedos), el parámetro *Salmonella* spp. (1,6 NMP/10 g sólidos totales), supera ligeramente el valor de la normativa (1 NMP/10 g sólidos totales).

Referencias

Campos, M., et al. (2017). Huevos de helmintos como indicadores de contaminación de origen fecal en aguas de riego agrícola, biosólidos, suelos y pastos. *Biomédica*, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, D.C., Colombia. <https://revistabiomedica.org/index.php/biomedica/article/view/3352/3873#citations>

Castrjón, A., et al. (2002). Evaluación de la calidad de lodos residuales de México. *Congreso Nacional de la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales* (13, Guanajuato, México). Universidad Nacional Autónoma de México.

<https://www.researchgate.net/publication/228368946> Evaluacion de la calidad de lodos residuales de Mexico

Castro, E. (2022). Determinación de la efectividad del lombricompostaje en la estabilización de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín. Tesis de pregrado, Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.

Environmental Protection Agency. (2002). Standards for the use or disposal of sewage sludge. *Federal Register, Title 40. Protection of Environment: Part 503*. United States.

FAO. (2013). *Manual de compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina*. Roman, P., Martínez, M., & Pantoja, A. Santiago, Chile.

Gobierno del Perú. (2017). Decreto Supremo N° 015-2017: Reglamento para el reaprovechamiento de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales. *Diario Oficial El Peruano*.

González, E., Campante, M., & Cruz y Fernández, N. (2009). Concentración total y especiación de metales pesados en biosólidos de origen urbano. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992009000100002

López, S., et al. (2019). Tratamiento de lodos residuales municipales con un proceso aerobio-termofílico. *Morelos, México*. <https://www.researchgate.net/publication/265996097> Tratamiento de lodos residuales municipales con un proceso aerobio-termofílico

Metcalf, & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización* (3a ed.). McGraw-Hill.

Morales, M. (2005). Digestión anaerobia de lodos de plantas de tratamiento de aguas y su aprovechamiento. Tesis de Ingeniería, Universidad de Las Américas, Puebla, México.

Organización Mundial de la Salud. (2018). Salmonella (non-typhoidal). [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/salmonella-\(non-typhoidal\)](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/salmonella-(non-typhoidal))

PROREGIÓN. (2008). Mejoramiento y ampliación de los sistemas de agua potable y alcantarillado de la ciudad de Celendín: Memoria de cálculos. Celendín, Cajamarca.

Quinchía, A., & Carmona, D. (2004). Factibilidad de disposición de los biosólidos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales combinada. *Revista EIA*.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372004000200009

Vélez, J. (2007). Los biosólidos: ¿una solución o un problema?
http://repository.unilasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/532/1/PL_V2N2_57-71_biosolidos.pdf

World Health Organization. (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume II. Wastewater use in agriculture*. Ginebra.