

Caracterización de los biosólidos como materia prima sostenible para la industria

Steeven Cuti¹, Andres Urbina²

scuti@tecnologicoismac.edu.ec; andres.urbina@qsi.ec

¹ Instituto Tecnológico Universitario ISMAC, Belermo S2-02 y Oswaldo Guayasamin,170184, Quito-Ecuador

² QSI ECUADOR SA, Av. Galo Plaza Lasso 10640, Quito 170138, Quito-Ecuador

Pages: 120-132

Resumen: Los biosólidos pueden ser una fuente de contaminación en el ambiente, puesto que forman lixiviados, son tóxicos y podrían generar malos olores. Esta investigación tiene como objetivo realizar una caracterización física, química y biológica de biosólidos obtenidos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, en Ambato-Ecuador. La metodología propuesta en esta investigación es de enfoque cuantitativo, tipo de investigación experimental y el uso de técnicas de campo y laboratorio. Primero, se ejecutó una etapa de revisión documental bibliográfica; segundo, se recolectó muestras de biosólidos; y tercero, se realizó su caracterización física, química y biológicamente. El biosólido se categoriza como suelo orgánico de baja plasticidad (OL) desde el punto de vista físico. Químicamente, se destaca la presencia de Sílice (19,65%) y Plagioclasas (72%). La evaluación biológica (CRETIB) concluye que no es tóxico; por lo tanto, los biosólidos podrían emplearse en diversas etapas de la industria en la construcción.

Palabras-clave: biosólidos, plantas de tratamiento, aguas residuales, CRETIB

Characterization of Biosolids as a Sustainable Raw Material for the Industry

Abstract: Biosolids can be a source of environmental contamination as they form leachates, are toxic, and could generate unpleasant odors. This research aims to perform a physical, chemical, and biological characterization of biosolids obtained from the Wastewater Treatment Plant in Ambato, Ecuador. The proposed methodology in this research is quantitative, of an experimental research type, and involves the use of field and laboratory techniques. First, a stage of documentary bibliographic review was conducted; second, biosolid samples were collected; and third, their physical, chemical, and biological characterization was carried out. The biosolid is categorized as low plasticity organic soil (OL) from a physical perspective. Chemically, the presence of Silica (19.65%) and Plagioclase (72%) is highlighted. The biological evaluation (CRETIB) concludes that it is not toxic; therefore, the biosolids could be used in various stages of the construction industry.

Keywords: biosolids, treatment plants, wastewater, CRETIB

1. Introducción

El tratamiento de las aguas residuales ha generado una preocupación a nivel mundial; puesto que muchos países invierten altas cantidades de dinero en su tratamiento y disposición final. Seguir los diversos tratamientos, procesos y protocolos para descontaminar las aguas residuales resulta complejo, pero beneficia a la calidad de vida humana, la protección del ambiente y el desarrollo económico de las naciones (UNESCO, 2018).

De acuerdo con Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas en el año 2017, en su repositorio AQUASTAT, se determina que anualmente descargan 2.212 km³ de aguas residuales en forma de efluentes municipales, industriales y aguas de evacuación agrícola; muchas de estas sin previo tratamiento. Por lo tanto, es necesaria la depuración de las aguas residuales por medio de las plantas de tratamientos, denominadas también como PTAR (UNESCO, 2017).

Independientemente del proceso o método de depuración, del agua residual, se genera un subproducto denominado como lodos residuales o biosólidos. Sin embargo, la disposición final de los biosólidos en el ambiente, sin tratamiento o procesos de estabilización, puede generar efectos adversos a la salud humana y al ambiente, ya que contienen microorganismos patógenos y elementos químicos, como metales pesados, y material orgánico en cantidades muy considerables (Metcalf & Eddy, 2004)

Estos residuos, que incluyen elementos biológicos y otros materiales, son un punto de preocupación ambiental por la alta carga contaminante que poseen y actualmente su disposición final es una dificultad para las empresas; generalmente son sometidos a varios procesos de tratamiento para reducir su contenido de patógenos y estabilizar su composición (Paz, Henríquez, & Freres, 2007).

En esta investigación se pretende verificar, experimentalmente, la caracterización física, química y biológica en muestras de biosólidos obtenidos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), el Peral, Ambato-Ecuador, a través de ensayos y pruebas de laboratorio para su posible uso ecológico en la industria. Por lo tanto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿los biosólidos son una alternativa ecológica para su uso en la industria?

2. Marco Teórico

2.1. Aguas Residuales

De acuerdo con la AQUASTAT¹ (Sistema de Información Global de la FAO sobre Recursos Hídricos y Gestión Agrícola) a nivel mundial se utilizan aproximadamente 4000 km³ de agua dulce anuales, de esta cantidad el 45% se utiliza en la agricultura, el restante (55%) es utilizado por el hombre en sus diferentes actividades, y que luego son vertidas al ambiente como aguas residuales tanto como efluentes municipales e industriales (FAO, 2023).

2.2. Tratamiento de aguas residuales

Existen varios mecanismos o sistemas para la descontaminación de las aguas residuales, estas pueden clasificarse usando dos grandes metodologías para su depuración; la primera utiliza procesos físico-químicos, y la segunda, usa procesos biológicos; dependiendo de la composición y caracterización del agua (Metcalf, & Eddy, 2004).

En el tratamiento primario se prepara al agua residual, limpiándola de aquellos materiales que, por sus dimensiones, pueden llegar a dañar los equipos y procesos consecuentes; en promedio se eliminan el 60% de sólidos suspendidos (Chávez, 2017). En el tratamiento secundario se busca la reducción o eliminación de materiales orgánicos, la desestabilización y agrupación de contaminantes, para separar del agua de las partículas en suspensión y así facilitar su decantación; generalmente, en este proceso se utiliza bacterias y procesos físicos-químicos (Arboleda, 2000). El tratamiento terciario es la fase previa a la descarga del agua al cuerpo receptor y se debe asegurar que el agua posea las características de calidad esperadas; en este tratamiento, se pretende eliminar nutrientes, metales pesados, micro contaminantes orgánicos, mediante el uso de procesos físico-químico avanzados (Folch, 1997).

2.3. Los biosólidos

Los biosólidos son subproductos líquidos, sólidos o semisólidos generados durante el tratamiento de aguas residuales. Esto incluye a sólidos removidos en tratamientos primarios, secundarios o terciarios y material derivado, que generalmente están compuestos entre el 60-80% de materia orgánica, el 20-40% de materia inerte, el 3-5% de N y muy escasamente de K y P; además de la posible existencia de metales pesado y microorganismos patógenos: bacterias, parásitos intestinales y virus (Cruz, 2015).

Las características de los biosólidos pueden variar dependiendo del proceso de tratamiento al que hayan sido sometido y de las normas específicas de cada país o región. De acuerdo con Paz, Henríquez & Freres (2007), en su literatura “Según sus características sanitarias”, se clasifican de la siguiente manera: lodos clase A, aquellos sin restricciones sanitarias para su aplicación benéfica al suelo (coli fecales < 1.000 NMP/g lodo) y lodos clase B, aquellos aptos para aplicación benéfica al suelo, con restricciones sanitarias de aplicación según tipo y localización de los suelos (coli fecales < 2.000.000 NMP/g lodo)”

2.4. Uso de los Biosólidos

Autores como Snyman, Alexander & Marks, (2000) argumentan que la disposición y/o aprovechamiento final de los biosólidos implica un reto económico y de ingeniería, puesto que el volumen y las cantidades que se generan involucran tanto la inversión en infraestructura como el desarrollo de tecnologías que reducen su volumen y alcanzar su estabilización para eliminar las propiedades contaminantes.

Para la disposición final de estos materiales se han estudiado algunas alternativas y muchas de estas han sido puestas en práctica; por ejemplo: La utilización agrícola con

sus distintas variantes (jardinería, agroforestería, entre otras) dando resultados positivos por ser fuente de una gran cantidad de materia orgánica (Nascimento & Barros, 2004) y nutrientes esenciales para las plantas, fundamentalmente N, P y Ca (Azevedo, Rocha, Lima, & Pohlman, 2001) considerándose como una práctica eminentemente sostenible. Esto se ve justificado ya que los nutrientes, dentro de los biosólidos, incrementan la biomasa y el rendimiento de las plantas (Brofas & Alifragis, 2000); dichos elementos en concentraciones altas pueden perjudicar a las características de los suelos y el desarrollo de las plantas de cultivo (Miralles, y otros, 2002).

Otra opción para el aprovechamiento de los biosólidos es la digestión anaeróbica, la cual se realiza en ausencia de oxígeno y genera biogás (compuesto principalmente por CH_4 , CO_2 y N_2), el cual puede ser utilizado como combustible para la producción de energía eléctrica (Rulkens, 2007).

Por otra parte Alleman James E. & Berman Neil A. (1984), investigaron el manejo de los biosólidos para elaborar materiales de construcción, elaborando bio-briks (Smol et al, 2015). Además, los biosólidos han sido aplicados en zonas afectadas por erosión, compactación o la disminución de su contenido de materia orgánica. Estos revitalizan y mejoran la calidad del suelo al incrementar su capacidad de retención de humedad y nutrientes (Barrera, Campos, & Montoya, 2007).

3. Método

La metodología utilizada en esta investigación fue de enfoque cuantitativo, el tipo de investigación fue experimental de campo y laboratorio, se utilizó una técnica de revisión documental bibliográfica acompañada de la recolección de muestras de biosólidos obtenidos de la PTAR, el Peral, Ambato-Ecuador. Este estudio fue elaborado en tres momentos: Una revisión bibliográfica, La recolección de datos en campo para la caracterización física, química y biológica de los biosólidos, y el análisis de la viabilidad de un posible uso de éstos en la industria. A continuación, se explica los procedimientos, métodos y materiales usados en esta investigación. Se colectó 5 kg de muestra de biosólido del lecho de secado de la PTAR; para esto, se homogenizó el material y se almacenó en sacos industriales de polietileno de alta densidad y resistencia para estudiar sus características físicas, químicas y biológicas.

3.1. Caracterización física

La caracterización física del biosólido fue realizada en el Laboratorio de Ensayos de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas, LEMSUR, basándose en los procesos del manual American Standard of Testing Materials (ASTM). Las pruebas de laboratorio que se realizaron fueron: Contenido de humedad (%), Índice de plasticidad, Densidad de sólidos y Granulometría de partículas finas y gruesas. En la Tabla 1 se presentan los resultados de estos ensayos (Análisis de resultados).

3.1.1. Contenido de humedad

El ensayo de contenido de humedad en la muestra de biosólidos se fundamentó en los procedimientos establecidos en las normas INEN 690 y ASTM D 2216-10 por duplicado.

3.1.2. Índice de plasticidad

Para determinar el índice de plasticidad, se determinó el límite líquido y límite plástico de la muestra de biosólido, siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ASTM D 4318-10.

3.1.3. Densidad de sólidos

Este ensayo fue elaborado bajo los parámetros establecidos en las normas; ASTM D6913-04 (2009), ASTM D7928-16 y ASTM D854-14, medidos a temperatura ambiente de 20°C. La Figura 1 presenta gráficamente parte del proceso de este ensayo.



Figura 1 – Ensayo de laboratorio de densidad de sólido (Gs)

3.1.4. Granulometría de fino y gruesos

La granulometría de partículas finas y gruesas se determinó mediante el ensayo del hidrómetro [ASTM D6913-04 (2009), ASTM D7928-16 y ASTM D854-14] y por el tamizado del W. S. Tyler test Sieve (ASTM D-422) respectivamente. La Figura 5 presenta la curva de distribución granulométrica total de partículas del biosólido.

3.2. Caracterización química

La determinación de las propiedades químicas de la muestra de biosólido fue realizada en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica del Ecuador EPN. Los ensayos realizados fueron: Difracción de Rayos X (DRX) y Fluorescencia de Rayos X y sus resultados se presentan en las Tabla 2 y 3 (Análisis de resultados).

3.1.1. Difracción de Rx (DRX)

El ensayo de Difracción de Rx se basó en las especificaciones del Manual de Operación del Difractómetro de Rayos X (D8 ADVANCE). Para esta prueba se pulverizó 50 g de muestra de biosólido, previamente secada ($110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$), en un horno por 24 h. La Figura 2 indica las muestras de biosólido durante el ensayo de FDR.

3.1.2. Fluorescencia de Rayos x

Este ensayo se realizó bajo los parámetros establecidos en el manual GEO-QUANTM, del equipo de Fluorescencia de Rayos X (S8 Tiguer). Se mezcló 6 g de muestra de lodo

previamente tratada con 30 g de fundente ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ al 99,5%) y se colocó en un perlador. La perla formada, del proceso anterior, fue llevada a la máquina de Florescencia de Rayos (S8 Tiguer) tal como se presenta en la Figura 3.



Figura 2 – Ensayo de DRX en el biosólido



Figura 3 – Ensayo de DRX

3.3. Caracterización biológica

La caracterización CRETIB (Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Inflamabilidad e biológicamente infecciosa) del biosólido permite determinar la peligrosidad de un material en el ambiente, de acuerdo a la norma mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005; la Figura 4 muestra gráficamente el experimento. Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDIA-EPN), de la Escuela Politécnica Nacional. La Tabla 4 presenta los resultados obtenidos en esta caracterización.

En la caracterización de la **corrosividad**, se utilizó 20 g de muestra de lodo mezclados con 80 ml de agua destilada (relación solido-agua 1:4), usando un pH-metro (OAKTON S10), se registró el valor del pH.

Durante la caracterización de **reactividad**, se colocó 5 g de muestra de biosólido junto con 5 ml de HCl [1N] en un vaso de precipitación; en otro vaso se colocó 5 g de muestra de biosólido junto a 5 ml de NaOH [1N], se observó su reacción.



Figura 4 – Caracterización CRETIB de la muestra de biosólido

Luego, en la caracterización de **explosividad**, se colocó 100 g de muestra de biosólido en un plato cerámico, luego ésta se introdujo a la incubadora (Memmeter), en las siguientes condiciones; temperatura de 110°C, sin corriente de aire y a una presión de 1.03 kg/cm².

Para determinar las características de **toxicidad**, se colocó 10 g de muestra de biosólido (previamente seco, molido y tamizado por N° 3/8 (9,5 mm)), en un vaso de precipitación junto a 200 ml de solución CH₃-COOH (pH = 4,5) y se agitó la solución por 24 horas. Posterior a esto, se analizó el lixiviado (1:20 sólido/líquido) controlando el pH inicial de la muestra con ácido acético hasta 4,8; identificando la presencia de Cu, Zn y Ni, por el método de Absorción Atómica, (Espectrofotómetro Perkin, modelo Analyst 300).

En la caracterización de **inflamabilidad**, se colocó 200 g de muestra seca de biosólido sobre un mortero, se utilizó el pistilo del mortero para generar fricción observar la generación de vapores o chispas.

Finalmente, para la caracterización **Biológico-infeccioso**, se colocó una suspensión de muestra de biosólido y agua salina (NaCl al 0,9%) sobre dos cajas Petri (previamente esterilizadas y con agar). Luego, las cajas Petri fueron incubadas por 48 horas para la formación de colonias bacterianas.

4. Análisis de resultados

En este apartado se presenta los resultados de las etapas de caracterización físico, química y biológicamente infecciosa (CRETIB) realizados en la muestra de biosólidos.

4.1. Caracterización física

La Tabla 1 presenta los resultados de los ensayos de laboratorio de la caracterización física de la muestra de biosólidos. La Figura 5 presenta la curva de distribución granulométrica de partículas finas y gruesas de la misma.

Ensayo	Valor	Unidad de medida
Humedad	23,0	%
Limite líquido	No aplica	-
Limite plástico	No aplica	-
Índice de plasticidad	No aplica	-
Densidad de solido	2,550	g/cm ³ (a 20°C)
Granulometría de material grueso	49,90	%
Granulometría de material fino	50,10	%

Tabla 1 – Caracterización de la muestra de biosólido

En la caracterización física del biosólido se puede observar que el 23% de la muestra contiene humedad, ya que el biosólido proviene del lecho de secado que se encuentra a la intemperie; además, no fue posible determinar los límites plásticos ni líquidos, por lo que se considera como material no plástico. El valor de la densidad de solido (Gs) en la muestra de biosólido es de 2,550 g/cm³, por lo que se clasifica como un suelo orgánico, esto también porque se origina de una PTAR.

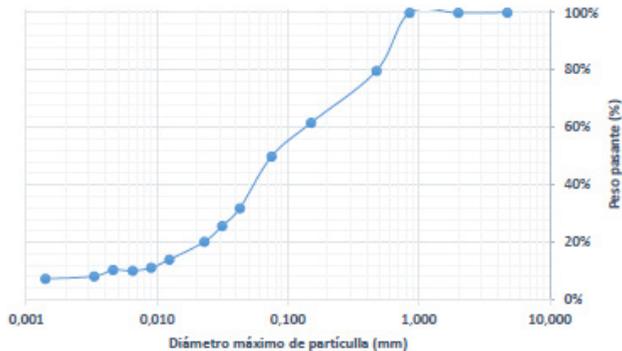


Figura 5 – Granulometría completa de la muestra del biosólido

El porcentaje de material fino (<0,075 mm) y grueso (>0,075 mm) es de 50,10% y 49,90% respectivamente, tal como lo muestra la curva granulométrica completa de la muestra de biosólido (Figura 5). De acuerdo con el Sistema Único de Clasificación de Suelos (SUCS), usada para cimentaciones, el biosólido se clasifica como un suelo orgánico de baja plasticidad (OL).

4.2. Caracterización química

La Tabla 2 presenta los resultados de los ensayos de laboratorio de la caracterización química de la muestra de biosólido. Se observa que el 72% de los minerales corresponde al grupo de las Plagioclasas ((Na,Ca)Al(Si,Al)Si₂O₈), este material es característico de los materiales rocos; además, se observa la presencia de Dolomita (CaMg(CO₃)₂) en el 12%, consecuente a que los biosólidos son estabilizados con cal (CaO). Por el contrario, existe apenas el 7% de Al₂(Si₂O₅)(OH)₄ (Caolinita) componente característicos de los insecticidas y pesticidas producto de la actividad del hombre.

Mineral	Fórmula	Biosólido (%)
Grupo Plagioclasas	(Na,Ca)Al(Si,Al)Si ₂ O ₈	72
Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	7
Corderita	Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈	3
Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	3
Cuarzo	SiO ₂	2
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	12
Grupo Plagioclasas	(Na,Ca)Al(Si,Al)Si ₂ O ₈	72

Tabla 2 – Ensayo de DRX, minerales en el biosólido

Para finalizar, la Tabla 3 indica los elementos químicos identificados en la muestra del biosólido. En esta tabla se puede observar que el elemento predominante es el Silice (Si) en el 19,65% y, por otra parte, el Al, Fe, Ca, Na, Mg y otros están en cantidades menores al 6%.

Elemento	Contenido (%)
Si	19,65
Al	6,32
Fe	3,2
Ca	6,44
Na	2,09
Mg	1.19
K, Ti, Cl, Mn, Sr, P, S, Cu, Zn, Ni	Menor al 1,8%

Tabla 3 – Ensayo de DRX, minerales del biosólido

4.3. Caracterización biológica

La Tabla 4 presenta la caracterización CRETIB (Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad, Biológico-infeccioso) ensayados en la muestra de biosólido. El biosólido no presenta características corrosivas, ya que el valor de pH registrado fue de 8,95; por otra parte, no hubo reacción al colocar las soluciones de HCl (1N) y NaOH (1N). Después, la muestra de biosólido no presentó características explosivas durante

la incubación; además, los metales identidades en el lixiviado de la muestra fue de Zn (0,05 mg/l), Cu (0,05 mg/l) y Ni (0,44 mg/l), y las concentraciones escasas como para catalogarse como sustancia toxica. Finalmente, durante el ensayo biológico-infeccioso se puede identificar colonias de *Penicillium-fungy* verde, este microorganismo es muy general en material orgánico en descomposición.

Ensayo	Resultado
Corrosividad	pH =8,95 (a 19,5°C)
Reactividad	Sin reactividad
Explosividad	Sin detonación
Toxicidad	Zn (0,05 mg/l) Cu (0,05 mg/l) Ni (0,44 mg/l)
Inflamabilidad	No detectadas
Biológico-Infeccioso	<i>Colonias de Penicillium-fungy verde</i>

Tabla 4 – Caracterización CRETIB del biosólido

5. Discusión

Una vez realizada la caracterización del biosólido se observa que, respecto a las características físicas, se determinó que gran parte de su composición de partículas gruesas, tamaño de partícula >0,075 mm, corresponde al 49,90% y que, de acuerdo a los estudios de Barrera, Campos, & Montoya (2007); este material podría ser utilizado en proyectos de reconstrucción para rellenar terraplenes y vertederos la industria de la construcción, considerándose una práctica ambiental sostenible.

De acuerdo con la caracterización química del biosólido, se observa que el 72% de los minerales identificados es esta muestra, corresponde al grupo de las Plagioclasas ((Na,Ca) Al(Si,Al)Si₂O₈), este compuesto es muy característico de los materiales rocos y corrobora su utilización para la elaboración de materiales construcción, en la cual podría utilizarse como materia prima o material parcialmente sustituto. Estudios demuestran que estos biosólidos pueden ser utilizados en asfalto (Al Sayed, et al, 1995), morteros (Monzo et al, 1996), bloques, ladrillos (Alleman & Berman, 1984), adoquines, en remediación de suelos degradados que han sido dañados por erosión (Zubillaga, 2012), entro otros.

Finalmente, existen aplicaciones en los que se han utilizado biosólidos como enmiendas del suelo en la agricultura ya que portan importantes nutrientes como N, P y materia orgánica al suelo, mejorando su calidad y fertilidad; esto mejora la productividad de los cultivos y disminuye el uso de fertilizantes químicos. Además, estos han sido utilizados para la producción de biogás y energía, lo que ayuda a reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables (Venegas, 2013).

Sin embargo, los biosólidos obtenidos de la PTAR, el Peral, Ambato-Ecuador, no podrían ser aprovechados para esta aplicación, ya que no se exploró una caracterización en la que se identifique cantidades de Nutrientes y materia orgánica mediante la utilización de proceso biológicos (digestión anaerobia). Finalmente, es importante enfatizar que el

uso de biosólidos debe realizarse de manera responsable y de acuerdo con regulaciones ambientales y de salud específicas para garantizar la seguridad pública y la protección del ambiente.

6. Conclusiones

La metodología utilizada en esta investigación permitió caracterizar física, química y biológica la muestra de biosólido. Con los ensayos de laboratorio se pudo determinar que esta materia podría ser un gran potencial en la industria de la construcción.

Los ensayos de laboratorio realizados durante las pruebas físicas, demuestran que los biosólidos podrían ser usados como algún sustituto de materia prima para la elaboración de materiales para la construcción, como por ejemplo en la elaboración de asfalto, morteros, bloques, adoquines y remediación de suelos degradados por la erosión.

Durante la caracterización química se utilizó el método de Absorción atómica que permitió identificar los elementos Cu, Zn y Ni, presentando valores 0,05 mg/l, 0,05 mg/l y 0,44 ml/g respectivamente. Estos resultados clasifican al biosólido como un material no tóxico; basándose en la norma mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005.

De acuerdo a la caracterización biológica del biosólido, análisis CRETIB, únicamente se verificó la presencia de colonia de *Penicillium-fungy verde*, que son comunes en elementos en descomposición; sin embargo, estos biosólidos no podrían ser utilizados en aplicativos como producción de biogás o de energía puesto que no se realizó ensayos más profundos de evaluación biológica; sin embargo, se podrían efectuar estudios complementarios que avalen su aplicación de estos biosólidos en otras industrias.

La aplicación de biosólidos de la PTAR, el Peral, Ambato-Ecuador, en las diferentes industrias, podría disminuir considerablemente los costos de manejo para la disposición final, además se genera menor impacto negativo en el ambiente y en la salud de la humanidad, por lo tanto, se consideran con una alternativa ecológica en la industria de la construcción.

Referencias

- Al Sayed, M. H., Madany, I. M., & Buali, A. (1995). Use of sewage sludge ash in asphaltic paving mixes in hot regions. *Construction and Building Materials*, 110(1),19–23.
- Alleman, J. E., & Berman, N. A. (1984). Constructive Sludge Management: Biobrick. *Journal of Environmental Engineering*, 110(2), 301-311.
- Arboleda, J. (2000). Teoría y práctica de la purificación del agua. Nomos , 200-201.
- ASTM D 2216-10, Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010. <https://www.astm.org/>
- ASTM D 4318-17e1, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. "<https://www.astm.org/>" www.astm.org

- ASTM D 6913-04(2009), Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009. <https://www.astm.org/>.
- ASTM D 7928-16, Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. <https://www.astm.org/>.
- ASTM D 854-14, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014. 72. <https://www.astm.org/>
- Azevedo, C. d., Rocha, A., Lima, M. R., & Pohlman, M. (2001). Efeito residual do lodo de esgoto alcalinizado em atributos químicos e granulométricos de um cambissolo húmico. *Scientia Agraria*, 87-91.
- Barrera, J., Campos, C., & Montoya, S. (2007). EXPERIENCIAS PILOTO DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE CANTERAS MEDIANTE EL USO DE BIOSÓLIDOS COMO ENMIENDA ORGÁNICA EN BOGOTÁ. Escuela de Restauración Ecológica (ERE), Unidad de Ecología y Sistemática (UNESIS), Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana. Carrera 7ª No. 43- 82.
- Brofas, G. P., & Alifragis, D. (2000). Sewage sludge as an amendment for calcareous bauxite mine spoils reclamation. *J. Environ. Qual*, 811-816.
- Chávez, I. (2017). Diseño e implementación de un sistema de Diseño e implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales. *Dom. Cien.*, ISSN: 2477-8818.
- Cruz, L. (2015). Optimización de la aplicación de lodos de depuración de aguas residuales al abonado o mejora de suelos. Universidad Politécnica de Madrid Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales .
- FAO. (15 de 5 de 2023). AQUASTAT: sistema de información global sobre el agua. Obtenido de <https://www.fao.org/aquastat/en/>
- Folch, M. (1997). Tratamiento terciario de aguas residuales por infiltración-percolación: parámetros de control. España de Creative Commons.
- Metcalf, & Eddy. (2004). Wastewater Engineering. Treatment and resource. McGraw Hill USA: Fourth Edition.
- Miralles, R., Beltrán, E., Porcel, M. A., Beringola, M. L., Martín, J. V., Calvo, R., & Delgado, M. M. (2002). Influencia de tres tipos de biosólidos de estaciones depuradoras en el desarrollo de estaquillas de olivo. *Int. Contam Ambient*, 163 - 169.
- Monzo, J., Paya, J., Borrachero, M. V., & Corcoles, A. (1996). Use of Sewage Sludge Ash (ssa)-Cement Admixtures in Mortars. *Cement and Concrete Research*, 26(9).
- Nascimento, C. W., & Barros, D. A. (2004). Soil chemical alterations and growth of maize and bean plants after sewage sludge application. *Bras. Ciênc.* Solo vol. 28, no. 2, , 385-392.

- Norma Oficial Mexicana [NOM]. (2006). NOM-052-SEMARNAT. establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. <https://www.sinec.gob.mx/SINEC/Vista/Normalizacion/DetalleNorma.xhtml?pidn=d3VtZitac2M4aW1mY1ozRDZmaEM3UT09>
- Paz, C., Henríquez, O., & Freres, R. (2007). Posibilidades de aplicación de lodos o biosólidos a los suelos del sector norte de la Región Metropolitana de Santiago. *Revista de geografía Norte Grande*.
- Rulkens, W. (2007). Lodos de depuradora como recurso de biomasa para la producción de energía: descripción general y evaluación de las diversas opciones. *Combustibles energéticos*, 9-15.
- Smol, M., Kulcycka, J., Henclik, A., Gorazda, K., & Wzorek, Z. (2015). The posible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. *Journal of cleaner production*, 52(1), 45-54.
- Snyman, H., Alexander, W., & Marx, C. (2000). Disposición en el suelo y reutilización agrícola de lodos de depuradora en el marco de las directrices sudafricanas actuales. Conferencia Bienal WISA.
- UNESCO. (2017). The United Nations world water development report 2017: wastewater: the untapped resource; facts and figures. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247553_spa
- UNESCO. (2018). Aguas Residuales el Recurso Desaprovechado. <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002476/247647s.pdf>
- Zubillaga, M. (2012). Remediación de suelos forrajeros contaminados con metales pesados: impacto de la aplicación de residuos orgánicos y fitoextracción. Universidade da Coruña. Departamento de Química Física e Enxeñaría Química I.