

ISSN: 2594-0937

REVISTA ELECTRÓNICA MENSUAL

Debates sobre Innovación

DICIEMBRE
2019

VOLUMEN 3
NÚMERO 1

XVIII Congreso Latino Iberoamericano de Gestión Tecnológica
ALTEC 2019 Medellín



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
METROPOLITANA
Unidad Xochimilco



MEGI
MAESTRÍA EN ECONOMÍA, GESTIÓN
Y POLÍTICAS DE INNOVACIÓN



LALICS

LATIN AMERICAN NETWORK FOR ECONOMICS OF LEARNING,
INNOVATION AND COMPETENCE BUILDING SYSTEMS

Diseño de prototipo de ladrillo a partir de biosólidos generados en la PTAR de Victoria, Caldas.

Proyecto SENNOVA: SGPS 3390-2018. Línea de innovación.

Juan David Salazar Espitia

SENA regional Caldas, Centro para la Formación Cafetera, SENNOVA, Colombia
jdsalazare@sena.edu.co

Mauricio Correa García

SENA regional Caldas, Centro para la Formación Cafetera, Tecnología en Química aplicada a la Industria, Colombia
mcorrea0055@misenda.edu.co

Hemelin Méndez Velásquez

SENA regional Caldas, Centro para la Formación Cafetera, Tecnología en Química aplicada a la Industria, Colombia
hmendez68@misenda.edu.co

Geiner Andrés Ossa Galvis

SENA regional Caldas, Centro para la Formación Cafetera, Tecnología en Química aplicada a la Industria, Colombia
gaossa4@misenda.edu.co

Resumen

En Colombia se encuentra en desarrollo la recuperación de cuerpos de agua superficiales debido a la baja calidad que estos presentan. Esta recuperación se está realizando por medio de la implementación de proyectos enfocados en el saneamiento hídrico, donde la calidad del agua es restablecida por medio de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). En estas, se genera un co-producto llamado biosólido, el cual es resultado de disminuir la carga contaminante de las aguas residuales. Este co-producto presenta propiedades atractivas para ser aprovechado de diferentes maneras, no obstante, en algunas ocasiones es considerado como un residuo debido al contenido de contaminantes que este material presenta, por lo cual es dispuesto en rellenos sanitarios, generando problemas de salud pública, contaminación del suelo, aire y agua. Según esto, en el presente proyecto se está investigando el diseño de un prototipo de ladrillo a partir de mezclas entre arcillas y biosólidos con el fin de contribuir al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible 12 (producción y consumo responsable), 13 (acciones por el clima) y 17 (alianzas estratégicas). La investigación se está desarrollando a través de la caracterización física, química y microbiológica de los biosólidos y arcillas; los biosólidos fueron obtenidos de la PTAR ubicada en Victoria, Caldas y las arcillas de la planta de producción de ladrillos de CASAGRES. Cabe resaltar que la caracterización se está realizando en diferentes instituciones por medio de una alianza estratégica, estas son: Universidad Católica de Manizales, Universidad Nacional de Colombia, Universidad de Caldas, Aguas de Manizales S.A. E.S.P. y CASAGRES. Para la elaboración del prototipo de ladrillo se han planteado adiciones de biosólido de 5%, 10%, 15% y 20% en una pasta arcillosa lo cual permitirá evaluar la calidad final del ladrillo con base en lo indicado en la NTC4205 y NTC4017.

Palabras clave

Planta de tratamiento de aguas residuales, biosólidos, prototipo, ladrillo, objetivos de desarrollo sostenible.

1 Introducción

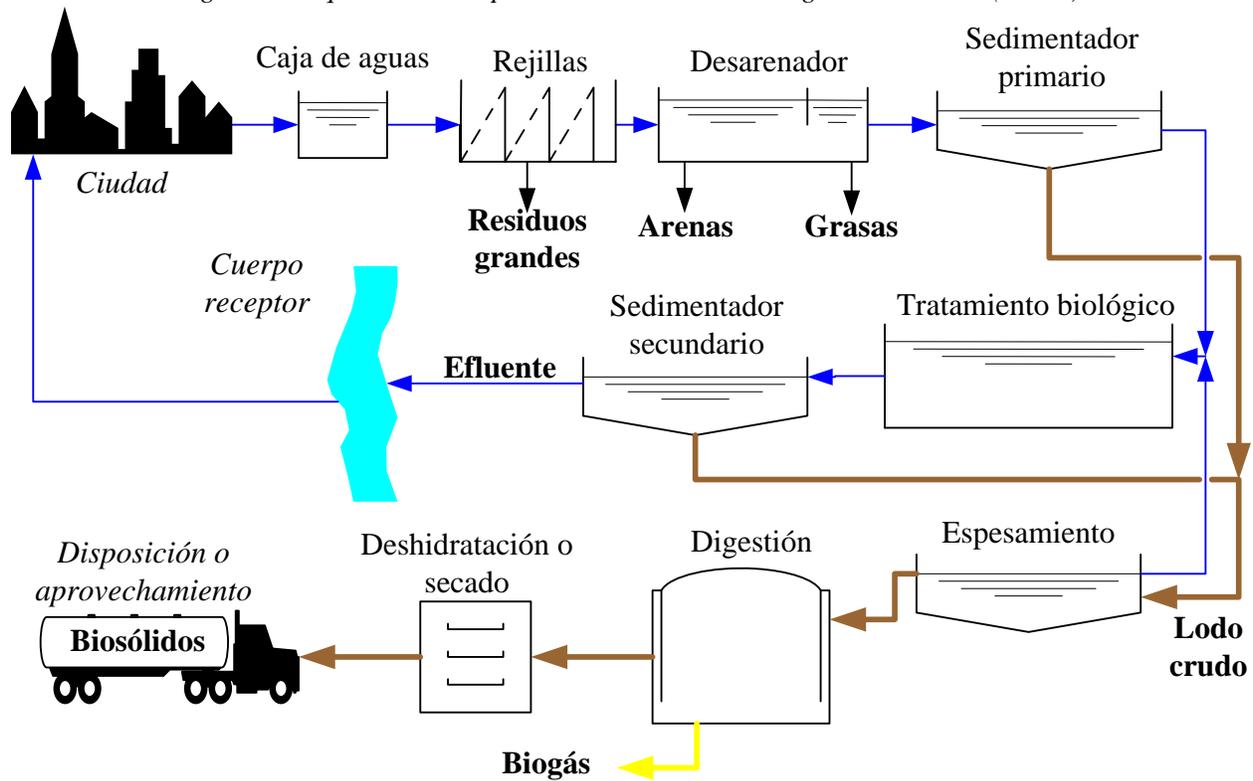
Los cuerpos de agua subterráneos y superficiales se encuentran degradados debido a la descarga desmesurada de vertimientos domésticos e industriales sin tratamiento o con tratamiento deficiente (Salazar-Espitia, 2018). Debido a esto se han implementado estrategias, como los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) los cuales propenden a conservar y preservar la humanidad y el medio ambiente (United Nations, 2015). De estos se resalta el ODS 6 cuyo fin es garantizar que cada persona posea un sistema adecuado de saneamiento en su hogar y que las aguas que se generan de las actividades domésticas sean transportadas, tratadas y dispuestas de una manera sostenible.

Según esto, se han generado estrategias a nivel regional y local con el fin de aumentar la cobertura de saneamiento hídrico, donde la principal estrategia ha sido la implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) las cuales disminuyen la carga contaminante generada por los vertimientos producidos en hogares, industrias, comercios, entre otros. En este proceso de tratamiento de aguas residuales se generan diferentes productos como se observa en la Figura 1 (Salazar-Espitia, 2018):

- ✓ Efluente: descarga de agua que ha pasado por una serie de tratamientos, el cual presenta una disminución en cargas contaminantes cumpliendo la normatividad vigente de vertimientos y objetivos de calidad del río, quebrada, laguna, entre otros.
- ✓ Residuos grandes: basuras de gran tamaño que son retiradas de las aguas residuales en la etapa de pretratamiento. Algunas de estas son: prendas de ropa, recipientes, implementos de aseo personal, hojas, troncos, entre otros.
- ✓ Arenas: partículas finas entre 0,15 y 0,2 mm obtenidas en la etapa de pretratamiento, específicamente en el desarenador.
- ✓ Grasas: fluido con alto contenido en aceites y grasas obtenido en la etapa de pretratamiento, principalmente de la trampa de grasas.
- ✓ Biogás: fluido gaseoso generado en el proceso de tratamiento de lodos, específicamente en la digestión anaerobia, el cual contiene metano y dióxido de carbono, principalmente.
- ✓ Biosólido: co-producto sólido obtenido del tratamiento de lodos el cual hace referencia a un lodo estabilizado de menor volumen.

De los diferentes productos generados en una PTAR, es necesario mencionar que, generalmente, el biogás es aprovechado para la generación de energía y que los residuos grandes, arenas y grasas tienden a ser dispuestos en rellenos sanitarios o en empresas especializadas en su disposición. De manera complementaria, se tiene que los biosólidos pueden ser dispuestos en un relleno sanitario debido a que contienen diversos contaminantes, no obstante, presentan un alto potencial de aprovechamiento ya que pueden contener sustancias o propiedades atractivas para su explotación (Mohajerani et al., 2019; Sharma, Sarkar, Singh, & Singh, 2017). En este sentido, el biosólido se puede definir como “producto obtenido del tratamiento de lodos que contiene bajas cantidades de materia orgánica, patógenos y humedad (con respecto al lodo crudo) y que presenta cualidades y propiedades atractivas para ser aprovechado teniendo en cuenta que pueden presentar contaminantes de interés” (Salazar-Espitia, 2018, p. 23).

Figura 1. Esquema de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).



Fuente: Salazar-Espitia (2018).

De este modo, para determinar el tipo de aprovechamiento o disposición de los biosólidos es necesario identificar su clasificación, la cual se realiza según su nivel de toxicidad, riesgo biológico y contenido de materia seca, principalmente (Andreoli, Sperling, & Fernandes, 2007). La toxicidad se mide por medio de la presencia de metales pesados y otras sustancias como contaminantes emergentes, herbicidas, compuestos orgánicos, entre otros; el riesgo biológico se mide a través de la presencia de microorganismos patógenos y virus, finalmente, el contenido de materia seca se evalúa a partir de los sólidos presentes. Cabe resaltar que, dependiendo del tipo de aprovechamiento o disposición seleccionado, es necesario caracterizar otro tipo de sustancias o contaminantes para validar su aplicación.

De acuerdo con esto, en el presente proyecto se realizará el muestreo, caracterización y clasificación del biosólido según lo indicado en el Decreto 1287 del 2014 (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (Minvivienda), 2014) con el fin de verificar su posibilidad de aplicación como insumo en materiales de construcción, asimismo, se desarrollarán mezclas entre arcilla y biosólido con el fin de diseñar un prototipo de ladrillo al cual se le evaluará su calidad final según la NTC 4205-1 (ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones, 2009a), NTC 4205-2 (ICONTEC, 2009b) y NTC 4017 (ICONTEC, 2018) con el propósito de generar un aprovechamiento sostenible del biosólido, propender a la correcta gestión de residuos sólidos y generar investigación aplicada al proceso productivo de la empresa CASAGRES, la cual es productora de ladrillos.

2 Problema

Las aguas residuales contienen contaminantes resultado de actividades antrópicas, estas pueden ser de origen agrícola, industrial, doméstica, comercial, entre otras. Se ha demostrado que, a nivel mundial, el 20% de las aguas residuales tratados, donde en Colombia se trata el 24,9% (referentes a 0,597 km³ de 2,395 km³ de agua residual en el 2010) lo que es referente a países poco desarrollados o en vía de desarrollo (Sato, Qadir, Yamamoto, Endo, & Zahoor, 2013; UN-Water, 2019). Debido a esta baja cobertura de saneamiento hídrico, MinVivienda (2014) generó en el 2007 el programa de Saneamiento de Vertimientos en donde se busca recuperar la calidad del agua de las 10 cuencas más contaminadas de Colombia por medio de la implementación de numerosas PTAR. Este aumento en la cobertura de saneamiento hídrico será proporcional con la producción de biosólidos y los costos de operación ya que este material puede representar entre el 1% y 2% del caudal aguas residuales y su manejo y disposición tiende a ser del 40 al 60% del costo operacional de la planta (Andreoli et al., 2007; Riffat, 2013).

En caso de que el biosólido sea considerado como un residuo y no como un recurso, se estaría contribuyendo a la incorrecta gestión de residuos sólidos en Colombia, ya que de 810.000 toneladas generadas de basuras mensuales, únicamente el 17% es reciclado o aprovechado. Del mismo modo, se estaría aportando a la generación de emergencia sanitaria en Colombia, puesto que se estima que 321 rellenos sanitarios del país cumplirán su vida útil en los próximos 5 años (CORPOCALDAS, 2018).

3 Metodología

Los análisis para la caracterización de los biosólidos se realizaron en laboratorio de plantas, laboratorio de aguas y laboratorio de fluorescencia de rayos X de la Universidad Nacional de Colombia (UN-Manizales, UN-Manizales y UN-Bogotá¹, respectivamente) y laboratorio de ciencias del Centro para la Formación Cafetera del SENA regional Caldas. Los parámetros evaluados, su importancia y las técnicas respectivas son:

- ✓ **Granulometría:** permite asociar el tamaño de las partículas de la materia prima con el tipo de material predominante de la siguiente manera: grava (>2,36 mm), arenas (0,075 – 2,36 mm), limos (0,002 – 0,075 mm) y arcilla (<0,002 mm) por técnicas de tamizado en seco e hidrometría los cuales se realizaron en UN-Manizales y CASAGRES de acuerdo a la ASTM D42-63. De acuerdo con este resultado es posible determinar el punto del proceso productivo de ladrillos al que se debe adicionar los biosólidos y las mezclas óptimas a realizar entre la pasta arcillosa y los biosólidos para cumplir con los requisitos de los tamaños de partículas necesarios para desarrollar la pasta cerámica.
- ✓ **Composición fisicoquímica:** por medio de la técnica de fluorescencia de rayos X en UN-Bogotá (a través de la Universidad Católica de Manizales - UCM) fue posible identificar cualquier material (en su composición elemental) que se encuentre en una concentración superior a 100 ppm o 0,1% con lo que se busca identificar los óxidos, metales pesados, nutrientes, contaminantes, entre otros, sin embargo, no identifica los materiales más livianos

¹ El análisis en la UN-Bogotá fue patrocinado por la Universidad Católica de Manizales (UCM), como apoyo al proyecto.

como hidrógeno, oxígeno, carbono, litio, berilio, boro, nitrógeno y elementos transuránicos. Para este ensayo se empleó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, MagixPro PW – 2440 Philips equipado con tubo de Rodio con potencia máxima de 4 kW.

Por otro lado, en la UN-Manizales se realizó la granulometría con base en la norma ASTM D422, sólidos totales y sólidos volátiles por medio del método SM 2540 G, análisis próximo (humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo) por medio de la ASTM E871-82, E87-8, E1755-01 y E870-8. De igual manera, se realizó el análisis de poder calorífico superior (HHV) por medio de la técnica calorimétrica, la cual constaba de un baño de inmersión en el equipo SDACM3100 *Bomb Calorimeter* con una presurización de la muestra con oxígeno a 3 MPa y temperaturas de operación entre 24°C y 42°C.

Finalmente, en el SENA regional Caldas se realizó sólidos totales y sólidos volátiles por medio del método SM 2540 G, análisis próximo por medio de la ASTM E871-82, E87-8, E1755-01 y E870-8, grasas por el método Soxhlet y carbono orgánico total oxidable por medio de la NTC 5167, versión 2011.

- ✓ **Microbiológicos:** por medio del SENA regional Caldas se realizó Coliformes fecales y *Salmonella sp.* por la técnica de siembra en fondo en Agar Brillante y *Salmonella Shigella*.

Cabe resaltar algunos parámetros se obtienen por diferencia como se observa en la Ecuación 1, Ecuación 2 y Ecuación 3. Estos parámetros son Humedad, Sólidos fijos y Carbono fijo, respectivamente.

Ecuación 1. Relación entre sólidos totales (ST) y humedad.

$$ST + Humedad = 100\%$$

Ecuación 2. Fracción de sólidos volátiles (SV) y sólidos fijos (SF) en la materia seca.

$$SV + SF = 100\%$$

Ecuación 3. Análisis próximo

$$Humedad + materia volátil + cenizas + carbono fijo = 100\%$$

Inicialmente el biosólido deberá secarse hasta obtener una humedad menor al 10%. Esto se realizará por medio de secado al ambiente y en un horno a 105°C hasta obtener la humedad deseada. Una vez identificada la granulometría de los biosólidos, se procederá a realizar su clasificación con respecto a los tamaños de partículas o textura, lo que se identifica en la Figura 2. En caso de presentar gravas (ver Tabla 1), estas se deberán eliminar por medio de procesos de molienda o por tamizaje. Mientras más fina sea la materia prima, más alto es el porcentaje de humedad de moldeo y contracción de secado, al igual que la resistencia mecánica del producto final. Conocer la granulometría del biosólido resulta importante en la elaboración de materiales cerámicos debido a que a partir de esta se toman decisiones sobre el punto del proceso productivo al que se pueden agregar los biosólidos y las mezclas que se pueden desarrollar (Salazar-Espitia, 2019).

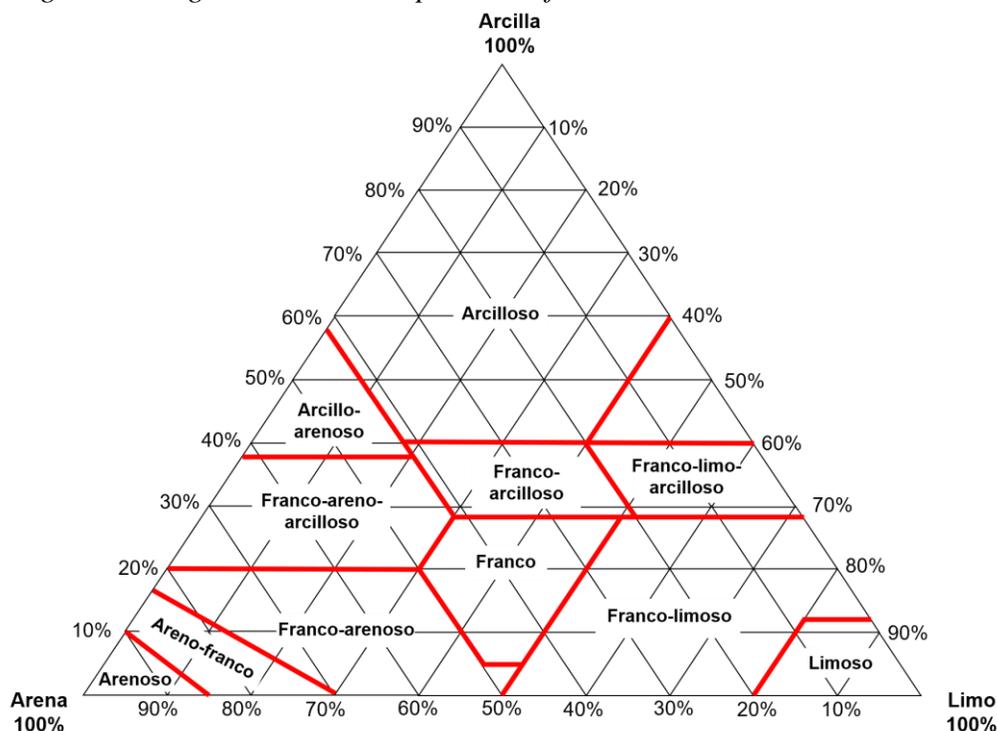
Tabla 1. Tamaños de partículas según los sistemas de clasificación.

Propiedad	SUCS, Norma INVIAS.		Norma AASHTO.		Norma ASTM.	
	Tamaño mínimo	Tamaño máximo	Tamaño mínimo	Tamaño máximo	Tamaño mínimo	Tamaño máximo
Grava (mm)	4,760	75,000	2,000	75,000	4,760	75,000
Arena (mm)	0,075	4,760	0,075	2,000	0,075	4,760
Limos (mm)	0,002	0,075	0,005	0,075	0,005	0,075
Arcillas (mm)	-	0,002	-	0,005	-	0,005

Fuente: adaptado de Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2012) y Velasco (2006). **Nota:** SUCS: Sistema Único de Clasificación del Suelo. AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials.

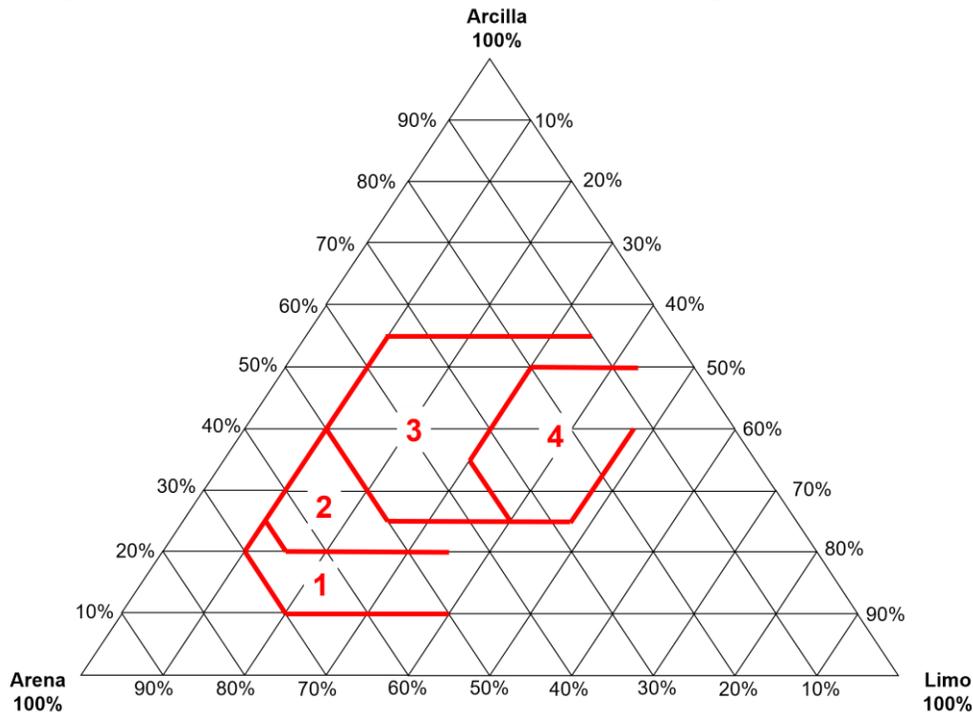
Al obtener las mezclas más adecuadas de los biosólidos y las demás materias primas, se deberá clasificar esta mezcla de acuerdo con la Figura 3 con el fin de definir el producto más viable. En caso de que la granulometría no haga referencia a productos viables, se realizarán balances de materia o se implementarán procesos de molienda o tamizaje para cumplir con los lineamientos establecidos (Salazar-Espitia, 2019). Es posible identificar en la Figura 2 que el tipo de materia prima arcillo-arenoso, franco-areno-arcilloso, franco-arcilloso y franco son los más aptos para la elaboración de estos materiales.

Figura 2. Diagrama de Winker para la definición de la textural del material.



Fuente: Salazar-Espitia (2019), García y León (2017).

Figura 3. Diagrama de Winker para la definición de productos viables.



Fuente: Salazar-Espitia (2019), García y León (2017). **Nota:** Los números hacen referencia a productos más viables, estos son: 1. Ladrillo común. 2. Ladrillos perforados. 3. Tejas y baldosas. 4. Bloques.

Para realizar las pruebas se usará como materia prima biosólidos molidos (Bio), a la cual se le redujo el tamaño de partícula por medio de un molino de cuchillas. El tamaño de partícula obtenido es menor a 1 mm.

Igualmente, se usan arcillas (Arc) y arenas (Are) como materia prima. Los productos a obtener se realizarán con base en las siguientes mezclas:

- Blanco 1 (B1): ladrillos hechos de 60% Arc y 40% Are.
- Mezcla 1 (M1): ladrillos hechos entre Bio y Arc, de acuerdo a las siguientes mezclas:
 - ✓ **M1.1:** 95% Arc – 5% Bio.
 - ✓ **M1.2:** 90% Arc – 10% Bio.
 - ✓ **M1.3:** 85% Arc – 15% Bio.
 - ✓ **M1.4:** 80% Arc – 20% Bio.

Las mezclas de las diferentes materias primas se realizan con base en el peso, como se indica en la Ecuación 4 y Ecuación 5.

Ecuación 4. Balance de materia global para la pasta seca.

$$W_{Arc} + W_{Bio} = W_{PS}$$

Donde:

W_{Arc} : Peso de la arcilla (g).

W_{Bio} : Peso de los biosólidos (g).
 W_{PS} : Peso de pasta seca - PS (g).

Ecuación 5. Proporción de biosólidos en pasta seca.

$$W_{Bio} = X_{Bio} * W_{PS}$$

Donde:

W_{Bio1} : Peso de los biosólidos (g).

X_{Bio1} : Proporción de biosólidos, en fracción decimal. Se evaluará entre 0% y 20%.

W_{PS} : Peso de pasta seca - PS (g).

Es necesario mencionar que la variable W_{PS} depende de la cantidad de pasta seca a elaborar, lo que a su vez se ve influenciado por la capacidad instalada para realizar probetas. Como base de cálculo se tiene que para elaborar una (1) probeta de 10 cm de largo, 5 cm de ancho y 2 cm espesor se pueden requerir hasta 200 g de pasta seca (esto se ve afectado por las dimensiones de la probeta). De acuerdo con esto, se recomienda obtener cantidades de PS de acuerdo a la capacidad instalada para la elaboración de las probetas.

Una vez realizadas estas mezclas y obtenidas las pastas cerámicas, se procede a agregar agua para homogeneizar y moldear la pasta. Las humedades de moldeo propuestas son²:

- ✓ **H2:** 17% (Mohajerani et al., 2019).
- ✓ **H3:** 18% (Mohajerani et al., 2019).
- ✓ **H4:** 19% (Gómez, Camargo, & Mozo, 2015).
- ✓ **H5:** 20% (Mohajerani et al., 2019).

Es necesario mencionar que la humedad de moldeo es variable entre diferentes estudios y depende directamente de las materias primas y su naturaleza. Según esto, es necesario hallar la humedad de óptima de moldeo (HOM) antes de realizar las probetas. Para la obtención de HOM se seguirá el siguiente procedimiento:

1. Obtener humedad de Arc, Are y Bio.
2. Realizar el balance de materia de la PS como se observa en la Ecuación 4 y Ecuación 5.
3. Realizar el balance de materia del agua en la PS como se observa en la Ecuación 6. Esto con el fin de obtener la humedad de la PS previo a la adición de agua.

Ecuación 6. Balance de materia del agua en la pasta seca.

$$W_{Arc} * H_{Arc} + W_{Bio1} * H_{Bio1} = W_{PS} * H_{PS}$$

Donde:

W_{Arc} : Peso de la arcilla (g).

² Se evaluarán humedades inferiores al 17% y superiores al 20% con el fin de evidenciar humedades que se ajusten a la mezcla arcilla-biosólidos y que permitan moldear la mezcla.

H_{Arc} : Humedad de la arcilla, en fracción decimal.
 W_{Bio1} : Peso de los biosólidos (g).
 H_{Bio1} : Humedad de los biosólidos, en fracción decimal.
 W_{PS} : Peso de pasta seca - PS (g).
 H_{PS} : Humedad de PS, en fracción decimal.

La necesidad de hallar la humedad de PS radica en que la PS es la materia prima para la elaboración de la pasta húmeda – PH, es decir, es necesario agregar agua a la PS para obtener PH. En la Ecuación 7 y Ecuación 8 se puede observar el balance de materia general y específico para el agua para la obtención de PH, respectivamente.

Ecuación 7. Balance de materia global para la pasta húmeda.

$$W_{PS} + W_A = W_{PH}$$

Donde:

W_{PS} : Peso de pasta seca - PS (g).
 W_A : Peso de agua a adicionar (g).
 W_{PH} : Peso de pasta húmeda – PH (g).

Ecuación 8. Balance de materia del agua en la pasta húmeda.

$$W_{PS} * H_{PS} + W_A = W_{PH} * H_{PH}$$

Donde:

W_{PS} : Peso de pasta seca - PS (g).
 H_{PS} : Humedad de PS, en fracción decimal.
 W_A : Peso de agua a adicionar (g).
 W_{PH} : Peso de pasta húmeda – PH (g).
 H_{PH} : Humedad de PS, en fracción decimal. También conocida como humedad de moldeo.

Es posible observar que las variables W_A , W_{PH} y H_{PH} son incógnitas en la Ecuación 7 y Ecuación 8, ya que se desconoce la cantidad de agua a agregar, el peso final de PH y la humedad final de PH, sin embargo, esta última variable toma valores entre el 16% y 22% como lo indican Gómez et al. (2015) y Mohajerani et al. (2019). Según esto, al dar valores a la humedad de moldeo (H_{PH}), se obtiene un sistema de dos ecuaciones (Ecuación 7 y Ecuación 8) por dos incógnitas (W_A y W_{PH}), el cual se desarrolla para las diferentes humedades de moldeo.

De acuerdo con Mondragón y Padilla (2014), la humedad actúa como un agente ablandador de partículas, el cual produce un movimiento de deslizamiento entre las partículas lo que genera que estas se posicionen de manera más densa. El propósito de obtener diferentes humedades de moldeo es el de identificar la humedad óptima de moldeo - HOM, la cual permite obtener el ladrillo más denso, ya que por debajo de la HOM se presentan espacios vacíos dentro de la materia prima y por encima de esta, el agua ocupa los lugares de las partículas sólidas, disminuyendo su densidad o peso específico. La HOM se obtiene a partir de la máxima densidad calculada.

Los moldes se realizan con base en la NTC 296, la cual indica ladrillos modulares con 10 cm de largo y 5 cm de ancho. A partir de la PH se agregan proporciones de pasta al molde, el cual se observa en la Figura 4. El moldeo se realiza con la adición de ACPM como lubricante, este se aplica en pequeñas cantidades sobre los bordes del molde, en la superficie de moldeo y sobre la pasta cerámica. A medida que se agrega PH, se hace presión con las manos y con un martillo lo cual permite compactar la probeta. Finalmente, se usa una superficie lisa y que se ajuste a las medidas interiores del molde con el propósito extraer las probetas de la manera más uniformemente posible.

Una vez extraídas las probetas, se deben secar hasta obtener una humedad del 0%, ya que el agua durante la calcinación puede generar grietas en la probeta. Las temperaturas de secado reportadas han sido:

- ✓ **TS1:** 105°C por 12 h (Gómez et al., 2015).
- ✓ **TS2:** 60°C por 24 h (Molina et al., 2017).
- ✓ **TS3:** 105°C por 24 h (Mohajerani et al., 2019).

Figura 4. Molde para la elaboración de probetas.



Fuente: imagen propia.

Una vez el material es secado, se lleva al proceso de calcinación, el cual se realiza en muflas a nivel laboratorio. Este proceso se desarrolla con base en las siguientes rampas, aunque debido a que se usan arcillas provenientes de la empresa TEJARES TERRACOTA DE COLOMBIA S.A., se propone usar R3.

- ✓ **R1:** 0,7°C/min (Mohajerani et al., 2019).
- ✓ **R2:** 5°C/min (Gómez et al., 2015).
- ✓ **R3:** 2,8°C/min (información primaria TEJARES TERRACOTA DE COLOMBIA S.A.).

El proceso de calcinación se puede desarrollar a temperaturas superiores de 900°C (Gómez et al., 2015; Mohajerani et al., 2019; Molina et al., 2017). En este sentido, se evalúan las siguientes temperaturas para identificar la influencia en la calidad final de las probetas. Se debe mencionar que TC2 ha sido la temperatura usada en TEJARES TERRACOTA DE COLOMBIA S.A.

- ✓ **TC1:** 950°C.
- ✓ **TC2:** 1050°C.

El proceso de calcinación usado en TEJARES TERRACOTA DE COLOMBIA S.A. dura 8 horas, donde las primeras 6 horas la temperatura aumenta a una tasa de 2,8°C por minuto hasta TC2 y las últimas 2 horas se mantiene a TC2. Finalmente, se dejan enfriar las probetas hasta temperatura ambiente (lo que puede tomar hasta 12 horas) y se procede a analizar la calidad de las probetas.

4 Resultados

Tabla 2. Caracterización granulométrica del biosólido y arcilla.

Parámetro	Tamizaje en seco		Hidrometría		Arcilla
	Base con gravas	Base sin gravas	Base con gravas	Base sin gravas	
Gravas (> 2mm)	50,0%	0,0%	50,0% *	0,0%	0%
Arenas (> 75 µm)	38,6%	77,1%	32,5%	65,0%	21,95%
Limos (> 2 µm)	11,5%	22,9%	1,3%	2,5%	18,03%
Arcillas (< 2 µm)			16,3%	32,5%	60,02%

Fuente: elaboración propia. Nota: * Dato obtenido de UN-Manizales para normalizar los datos con base en gravas.

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica y microbiológica del biosólido generado en la PTAR de Victoria, Caldas.

Parámetro	SENA		UN-Manizales	
	Base seca	Base húmeda	Base seca	Base húmeda
ST (%)	100,00%	20,97%	100,00%	20,00%
Humedad (%)	0,00%	79,03%	0,00%	80,00%
SV (%)	47,30%	9,92%	47,50%	9,50%
SF (%)	52,70%	11,05%	52,50%	10,50%
Cenizas (%)	48,91%	10,54%	50,12%	10,02%
Materia volátil (%)	50,26%	10,54%	47,92%	9,58%
Carbono fijo (%)	0,83%	0,17%	1,96%	0,39%
PCS experimental (MJ/kg)	N.R.	N.R.	9,85	N.R.
PCS teórico (MJ/kg)	8,44	N.R.	8,18	N.R.
COT oxidable (%)	14,60%	3,06%	13,80%	2,76%
Grasas (%)	5,29%	1,11%	N.R.	N.R.
Coliformes fecales (UFC/g)	N.A.	1,32E+03	N.R.	N.R.
Salmonella (UFC/ 25 g)	N.A.	7,56E+02	N.R.	N.R.

Fuente: elaboración propia. Nota: ST: sólidos totales. SV: sólidos volátiles. SF: sólidos fijos. PCS: poder calorífico superior. COTx: carbono orgánico total oxidable. UFC: Unidades Formadoras de Colonia. N.R.: No reportado.

Tabla 4. Caracterización por fluorescencia de rayos X del biosólido generado en la PTAR de Victoria, Caldas.

Elemento	Valor elemental	Valor como óxido
Si	20,28%	43,80%
Al	5,38%	18,31%
Fe	9,02%	12,88%

Elemento	Valor elemental	Valor como óxido
P	2,75%	6,32%
S	2,40%	5,99%
Ca	3,73%	5,22%
K	1,75%	2,10%
Mg	0,96%	1,59%
Ti	0,85%	1,42%
Na	0,84%	1,01%
Cl	0,32%	-
Mn	0,31%	-
Zn	0,27%	-
Ba	0,21%	-
Zr	0,06%	-
Sr	0,05%	-
Cr	0,03%	-
V	0,03%	-
Br	0,02%	-
Co	0,02%	-
Ni	0,02%	-
Pb	0,02%	-
Rb	0,01%	-

Fuente: elaboración propia. **Nota:** El valor como óxido se obtiene al realizar las relaciones estequiométricas asumiendo únicamente la valencia de cada elemento como su respectivo óxido.

Tabla 5. Comparación de estudios similares que han empleado los biosólidos como insumo en materiales de construcción.

Composición elemental	Gómez, Camargo y Mozo (2015)	Molina, León y Mendoza (2017)	Bartolo et al. (2019)			Presente estudio
Silicio (%)	8,65%	25,97%	19,06%	21,72%	27,52%	20,28%
Aluminio (%)	4,35%	3,30%	3,88%	4,67%	5,17%	5,38%
Hierro (%)	6,33%	4,44%	4,91%	6,02%	6,71%	9,02%
Calcio (%)	2,81%	2,18%	7,36%	5,50%	1,75%	3,73%
Potasio (%)	0,92%	3,26%	1,43%	2,35%	0,76%	1,75%

Fuente: Salazar-Espitia (2019) elaboración propia.

Tabla 6. Resultados balances de materia en pasta seca (PS) y húmeda (PH).

Proporción de biosólidos (%)	Cantidad de biosólidos en PS (g)	Cantidad de agua a agregar (g)	Peso final pasta húmeda - PH (g)
0%	0	124,6	724,6
5%	30	120,2	720,2
10%	60	115,8	715,8
15%	90	111,3	711,3
20%	120	106,9	706,9

Fuente: elaboración propia. **Nota:** se tomaron 600 g de pasta seca para realizar el balance de materia.

5 Análisis

Con respecto a la granulometría (Tabla 2), en el tamizaje en seco se obtuvo que las gravas (partículas con un tamaño superior a 2 mm) y arenas (partículas con un tamaño superior a 75 μm) representan el 50% y 38,55% de la muestra seca, respectivamente, por lo que los limos y arcillas constituyen en conjunto al 11,45%. Debido al método utilizado, no fue posible diferenciar entre estos dos últimos parámetros ya que la máxima diferenciación del método es para partículas con tamaño superior a 38 μm (las arcillas son menores a 2 μm). En complemento con esto, se realizó la prueba de hidrometría la cual permitió clasificar las partículas menores a 2 mm (es decir, en ausencia de gravas). De acuerdo con esto, se obtuvo que las arenas, limos y arcillas representan 32,5%; 16,3% y 1,2%; respectivamente. Estos resultados se resumen en la Tabla 2. Según este resultado y por medio del triángulo textural (ver Figura 2), el biosólido se puede clasificar como un suelo franco areno-arcilloso.

La caracterización fisicoquímica y microbiológica se observa en la Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5. En esta es posible evidenciar que los biosólidos presentan un alto contenido de humedad a pesar de ser generados de lechos de secado, lo cual se debe a que los biosólidos habían permanecido 15 días antes de la toma de muestra. Según información primaria de Empocaldas S.A. E.S.P. (empresa encargada de la PTAR de Victoria, Caldas), los biosólidos suelen permanecer hasta 60 días en los lechos de secado en donde se obtienen humedades superiores al 50%-60%. La humedad de los biosólidos influye directamente en la capacidad de aprovechamiento del biosólido como insumo en materiales de construcción ya que en el proceso productivo es necesario realizar una molienda la cual se debe realizar a humedades máximas del 16%.

De acuerdo a los datos reportados de Zn, Cr, Ni, Pb (Tabla 4) Coliformes fecales y *Salmonella sp.* (Tabla 3), el biosólido se clasifica como tipo B según el Decreto 1287 del 2014, lo cual lo hace apto para ser usado como insumo en materiales de construcción. No obstante, el riesgo biológico debe ser reducido debido a que el proceso desarrollado en CASAGRES y a que la caracterización y aprovechamiento de este material es manual por lo que existen peligros hacia los empleados y personal de laboratorio por contaminación biológica.

Por otro lado, el contenido de SF y cenizas hacen referencia a la materia inorgánica del biosólido, mientras que los SV y materia volátil son indicativos de la materia orgánica. Este último parámetro es usado para determinar la estabilización del biosólido, el cual no cumple con el control de la capacidad de fermentación, atracción de vectores y patógenos indicado en el Anexo 1 del Decreto 1287 del 2014, el cual indica que el contenido de SV en el biosólido debe ser máximo del 38% (en base seca) para ser considerado como estabilizado. A pesar de este incumplimiento en la norma, se debe resaltar que un alto contenido de materia orgánica en el biosólido puede significar un beneficio en la calcinación del biosólido ya que esto incrementa su poder calorífico, significando un ahorro energético durante este proceso. El poder calorífico superior (PCS) experimental indicado en la Tabla 3 se encuentra dentro de los valores esperados (Mohajerani et al., 2019; Wiechmann et al., 2013) los cuales pueden significar un ahorro energético durante el proceso de fabricación del material cerámico.

La composición obtenida en la Tabla 4, específicamente de silicio, aluminio, hierro, calcio y potasio permite identificar que los biosólidos pueden ser útiles para el uso de materiales de construcción ya que al comparar con otros estudios similares (Tabla 5), los biosólidos se encuentran con valores importantes de óxidos para generar productos que cumplan con la normatividad colombiana de materiales de construcción. Otra propiedad importante que se debe resaltar es el contenido de azufre, ya que este es un contaminante durante la calcinación el cual genera gases SO_x.

Durante la elaboración del prototipo se evaluaron mezclas del 5%, 10%, 15% y 20%, en donde se obtuvo que la humedad óptima de moldeo fue del 18,5%. Se tomaron 600 g de pasta seca, cuyas proporciones de biosólidos y cantidades de agua agregadas se observan en la Tabla 6. Posteriormente se procedió a homogeneizar los biosólidos, arcillas y agua con el fin de desarrollar las probetas verdes³, estas fueron llevadas a un proceso de secado en un horno a 105°C hasta peso constante. En la etapa final de elaboración, las probetas verdes se llevaron a calcinación, la cual se realizó a TC2, es decir, 1050°C en una mufla. Las probetas obtenidas se observan en la Figura 5.

Figura 5. Visualización de material cerámico obtenido.



Fuente: elaboración propia.

Actualmente, se encuentra en desarrollo la evaluación de la calidad de los materiales cerámicos obtenidos, en donde se obtendrá la resistencia mecánica, absorción de agua, conductividad térmica, pérdidas por calcinación, deflexión, compresión, entre otros.

6 Conclusiones

³ Probeta verde hace referencia al material cerámico previo a la calcinación. Probeta gris indica el material cerámico calcinado.

- ✓ Es crucial conocer a un gran nivel de detalle el proceso productivo de la empresa CASAGRES con el fin de obtener los requerimientos del biosólido para ser usado como insumo en materiales de construcción de acuerdo al Decreto 1287 del 2014.
- ✓ El contenido de humedad y la concentración de coliformes fecales y *Salmonella sp.* indican que es necesario implementar pretratamientos al biosólido para que puedan ser incorporados en el proceso productivo de CASAGRES o como insumo en otro proceso de elaboración de materiales cerámicos.
- ✓ El trabajo interinstitucional ha permitido identificar falencias y aciertos de los diferentes laboratorios involucrados, permitiendo la mejora continua y la retroalimentación desde la experticia de los diferentes profesionales y estudiantes asociados.
- ✓ El contenido de metales pesados y patógenos permite clasificar el biosólido como tipo B de acuerdo al Decreto 1287 del 2014, lo que indica que es viable usarlo como insumo en materiales de construcción.
- ✓ La composición granulométrica de los biosólidos indica que es un material que puede ser usado como insumo en materiales de construcción, siempre y cuando, sea mezclado con arcillas en proporciones que permitan clasificarlo dentro de suelos franco-arcillosos, suelos francos o franco-areno-arcillosos.
- ✓ El valor de los sólidos volátiles y la materia volátil hacen referencia a un biosólido no estabilizado, el cual incumple el Decreto 1287 del 2014, sin embargo, este incumplimiento puede ser beneficioso para el proceso de calcinación ya que puede significar un ahorro energético como se comprobó con el valor obtenido del poder calorífico.

7 Referencias

- Andreoli, C. V., Sperling, M. von, & Fernandes, F. (2007). *Biological Wastewater Treatment Series Vol.6: Sludge Treatment and Disposal*. New Delhi, India: IWA Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-705-4.00021-6>
- CORPOCALDAS. (2018). Qué son los residuos y cómo clasificarlos. Retrieved July 8, 2018, from <https://www.youtube.com/watch?v=oUIMqELKLGU>
- García, R. A. L., & León, B. R. (2017). Caracterización hidrométrica de las arcillas utilizadas en la fabricación de productos cerámicos en Ocaña, Norte de Santander. *INGE CUC*, 13(1), 53–60. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.13.1.2017.05>
- Gómez, A., Camargo, G., & Mozo, W. (2015). Efecto de la adición de biosólido (seco) a una pasta cerámica sobre la resistencia mecánica de ladrillos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(27), 61–78. <https://doi.org/10.22395/rium.v14n27a4>
- ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. GESTION AMBIENTAL. CALIDAD DE AGUA. MUESTREO. PARTE 13. GUIA PARA EL MUESTREO DE LODOS DE AGUAS RESIDUALES Y PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS., Pub. L. No. NTC-ISO 5667-13:, 23 (1998).
- ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. NTC 4205-1: UNIDADES DE MAMPOSTERÍA DE ARCILLA COCIDA. LADRILLOS Y BLOQUES CERÁMICOS. PARTE 1: MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL. (2009).
- ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. NTC 4205-2: UNIDADES DE MAMPOSTERÍA DE ARCILLA COCIDA. LADRILLOS Y BLOQUES CERÁMICOS. PARTE 2: MAMPOSTERÍA NO ESTRUCTURAL. (2009).
- ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. NTC 4017: MÉTODOS PARA MUESTREO Y ENSAYOS DE UNIDADES DE MAMPOSTERÍA Y OTROS PRODUCTOS DE ARCILLA (2018). Colombia.
- Instituto Nacional de Vías - INVIAS. (2012). *NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INVIAS*. Bogotá D.C., Colombia.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (Minvivienda). Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, Pub. L. No. Decreto 1287 de

- 2014, 15 (2014). Colombia. Retrieved from [http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2014/Documents/JULIO/10/DECRETO 1287 DEL 10 DE JULIO DE 2014.pdf](http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2014/Documents/JULIO/10/DECRETO%201287%20DEL%2010%20DE%20JULIO%20DE%202014.pdf)
- MinVivienda. (2014). Portal Minvivienda Saneamiento para Vertimientos - SAVER. Retrieved February 1, 2019, from http://www.minvivienda.gov.co/Paginas/Viceministerios/Viceministerio_Agua/Saneamiento-para-Vertimientos---SAVER.aspx
- Mohajerani, A., Ukwatta, A., Jeffrey-bailey, T., Swaney, M., Ahmed, M., Rodwell, G., ... Setunge, S. (2019). A Proposal for Recycling the World ' s Unused Stockpiles of Treated Wastewater Sludge (Biosolids) in Fired-Clay Bricks. *Buildings*, 9(14), 1–22. <https://doi.org/10.3390/buildings9010014>
- Molina, N. F., León, S. A. I., & Mendoza, J. G. A. (2017). Biosólidos de tratamiento de aguas residuales domésticas, como adiciones en la elaboración de ladrillos cerámicos. *Producción + Limpia*, 12(2), 92–102. <https://doi.org/10.22507/pml.v12n1a8>
- Mondragón, R. H. L., & Padilla, A. M. G. (2014). Influencia de la humedad de compactación en el comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos, 6781, 9–21.
- Riffat, R. (2013). *Fundamentals of wastewater treatment and engineering*. (Taylor & Francis Group, Ed.). Londres: CRC Press.
- Salazar-Espitia, J. D. (2018). *Propuesta de tesis: Guía metodológica para el manejo y aprovechamiento de biosólidos en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Salazar-Espitia, J. D. (2019). *Guía metodológica para el manejo y aprovechamiento de biosólidos en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.
- Sato, T., Qadir, M., Yamamoto, S., Endo, T., & Zahoor, A. (2013). Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use. *Agricultural Water Management*, 130, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.08.007>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.002>
- United Nations. (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. *General Assembly Resolution 70/1, 25 September 2015, 16301*, 1–40. Retrieved from http://unctad.org/meetings/es/SessionalDocuments/ares70d1_es.pdf
- United Nations Water - UN-Water. (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. París.
- Velasco, L. G. C. (2006). Clasificación de los suelos. In *Mecánica de Suelos I* (pp. 1–56). Cauca: Universidad del Cauca.
- Wiechmann, B., Dienemann, C., Kabbe, C., Brandt, S., Vogel, I., & Roskosch, A. (2013). *Sewage Sludge Management*. Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/cdlodos/pdf/wastewatersludge117.pdf>