



**ESTUDIO DEL PROCESO DE RECARBONIZACIÓN Y RECUPERACIÓN
DE SUELOS DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN-RCD
(USAQUÉN-BOGOTÁ D.C.) POR MEDIO DE BIOSÓLIDOS**

Código: 2301-024

Laura Vanessa Vargas Guerrero

**Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, noviembre de 2023**

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción y demolición-RCD (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos

Laura Vanessa Vargas Guerrero

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Directora
Liliana Figueroa Del Castillo

Línea de Investigación:
Ingeniería para la Sostenibilidad

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia

2023

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

Acta de sustentación

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velara por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Dedicatoria

A Dios por ser mi apoyo, soporte, refugio y guía de vida.

A mi abuelita en el cielo, mi ángel y luz. Gracias a ti soy lo que soy.

A mi ángel de cuatro patas, mi compañero fiel.

A mi hermana, ejemplo de vida y mejor amiga. A mi familia, por su apoyo incondicional y confiar plenamente en que iba a cumplir todas mis metas.

(Autora, 2023)

Agradecimientos

A Dios por ser mi apoyo y guía, por bendecir mi camino y permitirme finalizar con éxito mis estudios universitarios. Por llenarme de paciencia, sabiduría, fe y ayuda para superar todas las adversidades y retos que se presentaron durante el desarrollo de la presente investigación.

A mi abuelita, mi ángel y luz, por haberme criado y enseñado el verdadero significado del respeto, responsabilidad y trabajo duro. A mis padres y hermana por siempre trabajar arduamente para garantizar mi crecimiento personal y académico, por su respaldo para salir adelante. A mi ángel de cuatro patas, por ser mi compañía fiel y nunca dejarme sola, por mostrarme el amor puro y sincero.

A mi directora, Liliana Figueroa Del Castillo, por creer en mí y siempre impulsarme a dar lo mejor, por brindarme sus valiosos y maravillosos conocimientos, su disposición, apoyo y por escuchar en todo momento mis aportes desde la academia, con respeto y profesionalidad que me caracteriza.

A mi compañero, Nicolás Mateo Vigoya Torres, Adriana y Zandy, por brindarme su tiempo y apoyo para el desarrollo de la fase experimental de la presente investigación. A los colaboradores y dueño de la Planta de Tratamiento de Residuos de Construcción y Demolición, por su disposición, apoyo y estar prestos a escuchar mis aportes desde la academia, con respeto, cortesía y profesionalidad.

Finalmente, a todas aquellas personas que hicieron parte de la presente investigación y me brindaron su compañía y ayuda durante la ejecución de cada una de las etapas que la conforman.

Tabla de Contenido

Listado de Tablas	10
Listado de Figuras.....	11
Resumen.....	12
Abstract.....	12
Introducción.....	13
1. Planteamiento del Problema.....	14
2. Pregunta de investigación.....	17
3. Justificación.....	17
4. Objetivos	19
4.1.Objetivo General.....	19
4.2.Objetivos Específicos.....	19
5. Marco de Referencia.....	19
5.1.Estado del Arte.....	19
5.2.Marco Teórico.....	22
5.2.1. ¿Cuál Resolución colombiana permite el aprovechamiento y disposición final de los residuos de construcción y demolición- RCD?	23
5.2.2. ¿Cuáles son los impactos a nivel social, económico y ambiental generados por los residuos de construcción y demolición- RCD en Colombia-Bogotá?.....	23
5.2.3. ¿Qué impactos generan los residuos de construcción y demolición sobre el recurso suelo?	24
5.2.4. ¿En qué consiste la adición de biosólidos como técnica de recuperación de suelos?.....	24
5.2.5. ¿Qué beneficios aportan los biosólidos en el proceso de recarbonización del suelo?.....	25
5.3. Marco Conceptual.....	26
5.3.1. Suelo.....	26
5.3.2. Degradación del Suelo.....	26
5.3.3. Degradación Física.....	27
5.3.4. Degradación Química.....	27
5.3.5. Degradación Biológica.....	27
5.3.6. Biosólidos.....	27
5.3.7. Recarbonización.....	27
5.3.8. Recuperación.....	28
5.3.9. Técnicas de recuperación de suelos.....	28
5.4. Marco Normativo.....	28
5.5.Marco Geográfico.....	31
5.5.1. Ubicación.....	31
5.5.2. Geología Estructural.....	32
5.5.3. Relieve.....	32
5.5.4. Clima.....	32
5.5.5. Recurso Hídrico.....	33
5.5.6. Vocación Uso del Suelo.....	33

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

5.5.7. Demografía.....	34
5.5.8. Economía.....	34
5.5.9. Conflicto uso de las tierras en el lugar de estudio.....	34
5.6. Marco Institucional.....	35
5.6.1. Universidad El Bosque.....	35
5.6.2. IGAC.....	35
5.6.3. CAR.....	35
5.6.4. Planta de Tratamiento de Residuos de Construcción y Demolición.....	36
5.6.5. Alimentos SAS S.A.S.	36
5.6.6. Agrilab.....	36
6. Metodología.....	37
6.1. Método.....	37
6.2. Enfoque.....	37
6.3. Alcance.....	37
6.4. Unidad de Análisis.....	38
6.5. Técnicas e instrumentos implementados en la recolección de información.....	38
6.5.1. Revisión de documentos.....	38
6.5.2. Observación.....	38
6.5.3. Comunicación Personal.....	38
6.5.4. Sistemas de Información Geográfica.....	39
6.5.5. Muestreo de Suelos.....	39
6.6. Técnicas e instrumentos implementados en la presentación y análisis de resultados.....	39
6.7. Plan de Trabajo.....	46
7. Resultados, análisis y discusión.....	66
7.1. Objetivo Específico N°1. Diagnosticar las condiciones iniciales del suelo y de los biosólidos a través de la caracterización física y química.....	66
7.1.1. Interpretación Matriz de Aspectos e Impactos Ambientales y Matriz de Vicente Conesa.....	66
7.1.1.1. Medio abiótico.....	70
7.1.1.2. Medio biótico.....	72
7.1.1.3. Medio socioeconómico.....	73
7.1.2. Análisis del estado inicial del recurso suelo.....	73
7.1.2.1. Propiedades Químicas.....	74
7.1.2.2. Propiedades Físicas.....	79
7.1.3. Análisis de las propiedades químicas del biosólido.....	82
7.2. Objetivo Específico N°2. Diseñar un prototipo ex situ para monitorear el proceso de recarbonización y recuperación de suelos bajo condiciones controladas.....	83
7.2.1. Construcción prototipo de recuperación de los tratamientos de suelo bajo condiciones controladas.....	84
7.2.2. Bitácoras de campo.....	85
7.2.3. Monitoreo y seguimiento. Análisis y Discusión.....	93

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

7.3.Objetivo Específico N°3. Comparar la eficiencia de las dosis del tratamiento de biosólidos sobre los procesos de recarbonización y recuperación de algunos indicadores de calidad del suelo como alternativa sostenible.....	95
7.3.1. Relación dosis suelo: biosólido e indicadores físicos y químicos de calidad y salud del suelo.....	95
7.3.2. Comprobación hipótesis. Implementación T Student.....	105
8. Conclusiones.....	106
9. Recomendaciones.....	107
10. Referencias Bibliográficas.....	108
11. Anexos.....	115

Listado de Tablas

<i>Tabla 1. Marco normativo de importancia para el desarrollo del proyecto.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 2. Matriz de actividades, indicadores, técnicas e instrumentos.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 3. Criterios de la metodología de Conesa.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 4. Rangos para el cálculo de la importancia ambiental.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 5. Ponderación del impacto.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 6. Calificación diámetro ponderado medio.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 7. Calificación del estado de agregación.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 8. Nivel de pH.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 9. Fósforo disponible y nitrógeno total.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 10. Porcentaje de materia y carbono orgánico, clima frío.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 11. Capacidad de Intercambio Catiónico y Saturación de Bases.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 12. Características generales de investigaciones sobre adición de biosólidos como enmienda orgánica.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 13. Matriz de aspectos e impactos ambientales.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 14. Matriz de Vicente Conesa.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 15. Resultados iniciales del muestro de suelos, propiedades químicas.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 16. Escala para clasificar los suelos según salinidad.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 17. Efecto general de la materia orgánica del suelo sobre algunas propiedades químicas.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 18. Resultados iniciales del muestro de suelos, propiedades físicas.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 19. Calificación de la porosidad total del suelo.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 20. Resultado de las propiedades químicas del biosólido.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 21. Propiedades físicas y químicas de biosólidos en diferentes países.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 22. Mes 1 (19 de mayo de 2023- 19 de junio de 2023).....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 23. Mes 2 (19 de junio de 2023- 19 de julio de 2023).....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 24. Mes 3 (19 de julio de 2023- 19 de agosto de 2023).....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 25. Mes 4 (19 de agosto de 2023- 16 de septiembre de 2023).....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 26. Comparación de los resultados obtenidos, parámetros físicos y químicos.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 27. Coeficiente de Pearson.....</i>	<i>97</i>

Listado de Figuras

Figura 1. Pérdida de carbono orgánico del suelo a nivel mundial.....	15
Figura 2. Stock de Carbono Orgánico de Suelos, Colombia.....	16
Figura 3. Múltiples beneficios provistos por las prácticas de manejo sostenible del suelo con base en el COS.....	25
Figura 4. Degradación física, química y biológica del suelo.....	26
Figura 5. Ubicación Geográfica Planta de Tratamiento de Residuos de Construcción y Demolición.....	31
Figura 6. Mapa Vocación Uso del Suelo, zona de estudio.....	33
Figura 7. Mapa Conflicto Uso de las Tierras en el lugar de estudio.....	35
Figura 8. Plan de Trabajo.....	46
Figura 9. Planta de Tratamiento de Residuos de Construcción y Demolición- RCD: diferentes sectores de la zona de estudio (A, B y C).....	47
Figura 10. Extracción muestra de suelo.....	50
Figura 11. Mapa Interpolación, zona de muestreo (recuadro amarillo).....	51
Figura 12. Medición de alófanos.....	52
Figura 13. Determinación temperatura edáfica.....	52
Figura 14. Medición presencia de carbonato de calcio.....	52
Figura 15. Cilindro metálico, densidad aparente.....	52
Figura 16. Peso suelo seco más capsula.....	52
Figura 17. Método de Yoder.....	53
Figura 18. Determinación de la densidad real del suelo, método del picnómetro.....	55
Figura 19. Biosólido; acumulación en tanques de decantación (A), envase para almacenamiento de la muestra (B).....	58
Figura 20. Plano en corte del sistema de tratamientos.....	63
Figura 21. Plano en planta del sistema de tratamientos.....	64
Figura 22. Termómetro edáfico.....	64
Figura 23. pH metro portátil.....	64
Figura 24. Maquinaria utilizada en etapa de recepción y descargue, y zona de relleno; volqueta y Bulldozer (A), Bulldozer (B), máquina trituradora (C).....	71
Figura 25. Determinación de carbonatos; punto 1 (A), punto 2 (B), punto 3 (C) y punto 4 (D).....	74
Figura 26. Determinación de alófanos, punto 1 (A), punto 2 (B), punto 3 (C) y punto 4 (D).....	78
Figura 27. Litología, zona de estudio.....	78
Figura 28. Temperatura edáfica; punto 1 (A), punto 2 (B) y punto 4 (C).....	79
Figura 29. Caja de madera, vista en corte (A), vista en planta (B).....	84
Figura 30. Tubo de PVC.....	84
Figura 31. Construcción sistema de tratamientos, puesta de cada tubo de PVC en el agujero (A), sistema de tratamientos (B).....	85
Figura 32. Temperatura Edáfica, Tratamientos.....	93
Figura 33. pH, Tratamientos.....	94
Figura 34. Conductividad Eléctrica, Tratamientos.....	94
Figura 35. Porcentaje de aumento carbono orgánico del suelo (COS).....	96
Figura 36. Coeficiente de Correlación de Pearson, Conductividad Eléctrica.....	98
Figura 37. Coeficiente de Correlación de Pearson, Capacidad de Intercambio Cationico.....	98
Figura 38. Coeficiente de Correlación de Pearson, Nitrógeno Total.....	99
Figura 39. Coeficiente de Correlación de Pearson, Relación C/N.....	100
Figura 40. Coeficiente de Correlación de Pearson, Humedad gravimétrica.....	102
Figura 41. Coeficiente de Correlación de Pearson, Estabilidad Estructural.....	102
Figura 42. Recuperación de propiedades químicas.....	103
Figura 43. Recuperación de propiedades físicas.....	104
Figura 44. Curva de distribución.....	105

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

Resumen

Las plantas de tratamiento de residuos de construcción y demolición -RCD cumplen un rol importante en las actividades de separación, clasificación, tratamiento y almacenamiento temporal de estos residuos, no obstante, el constante tránsito de maquinaria pesada, la creación de zonas de recepción y descargue, patio de clasificación y de acopio, y zona de rellenos necesarias para el funcionamiento de esta, generan un proceso de degradación de los suelos. Por tal razón, desde la ingeniería ambiental se propuso una estrategia sostenible de recarbonización y recuperación a través de la evaluación de la eficiencia del tratamiento de biosólidos en condiciones ex situ. Para ello se realizó el diagnóstico de las condiciones iniciales del suelo implementando la matriz de aspectos e impactos ambientales y matriz de Vicente Conesa las cuales justificaron la priorización del recurso para posteriormente realizar una caracterización física y química de los biosólidos y del suelo; luego se diseñó y construyó un prototipo ex situ implementando tres tratamientos de suelo: biosólido de la siguiente manera: tratamiento control sin contenido de biosólido (1:0) y dos con adición de biosólido en proporciones de 1:2 (T1) y 1:4 (T2). Pasados 4 meses de la implementación se obtuvo un incremento del 1,84%, 3,91% y 4,79% del carbono orgánico del suelo para el T0, T1 y T2 respectivamente, entre otros resultados que demostraron la eficiencia de los biosólidos como estrategia de recarbonización y recuperación de suelos degradados, siendo una investigación pionera en la zona de estudio y estableciendo un precedente para el desarrollo de futuras investigaciones.

Palabras clave: Biosólidos, Ingeniería Ambiental, Recarbonización, Recuperación, Residuos de construcción y demolición, Suelos

Abstract

Waste treatment plants for construction and demolition residues (CDW) play a significant role in the activities of separating, classifying, treating, and temporarily storing these residues. However, the constant movement of heavy machinery, the creation of reception and unloading areas, classification yards, storage areas, and fill zones necessary for its operation generate a soil degradation process. For this reason, a sustainable strategy for recarbonizing and recovery was proposed by environmental engineering through the evaluation of the efficiency of biosolid treatment under ex-situ conditions. To achieve this, the current soil conditions were diagnosed by implementing the matrix of environmental aspects and impacts, as well as the matrix of Vicente Conesa, which justified the prioritization of the resource. Subsequently, a physical and chemical characterization of the biosolids and soil was carried out. Then, an ex-situ prototype was designed and built, implementing three soil treatments with biosolid as follows: a control treatment without biosolid content (1:0) and two with the addition of biosolids in proportion of 1:2 (T1) and 1:4 (T2). After 4 months of implementing the treatments, an increase of 1,84%, 3,91% and 4,79% in soil organic carbon as obtained for T0, T1 y T2 respectively, among other results that demonstrated the efficiency of biosolids as a strategy for recarbonizing and recovery of degraded soils. This study represents pioneering research in the study area and sets a precedent for the development of future investigations.

Keywords: Sewage Sludge, Environmental Engineer, Recarbonizing, Recovering, Construction and demolition wastes, Soils

Introducción

En Colombia el sector de la construcción es el sexto sector económico más importante al representar el 5,1% del PIB del país, además es uno de los mayores generadores de puestos de trabajo lo que hace que su buen desempeño sea clave para lograr éxitos en otras variables como el desempleo y el consumo de los hogares (Guerrero, 2023). Sin embargo, esta actividad económica para el 2018 generaba un total de 22 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición- RCD al año, siendo Bogotá la ciudad que más generó con un promedio de 15 millones de toneladas al año, donde los mayores productores de estos residuos son el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) con una generación del 28%, las constructoras privadas con un aporte del 43%, la empresa de Alcantarillado y Acueducto de Bogotá (EAAB) con un total de 22% y la Unidad Administrativa Especial de Servicios Público (UAESP) con una generación de 3% (Perdomo Sierra & Guevara Chacón, 2020).

Si bien los RCD representan un problema ambiental y de salud pública al no otorgarles el adecuado manejo y disposición, en Bogotá la efectiva gestión, aprovechamiento y disposición final se regula mediante la Resolución 1257 del 23 de noviembre de 202 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la cual reglamenta el funcionamiento de los centros de tratamiento y/o aprovechamiento (CTA) donde se realizan actividades de separación, clasificación, tratamiento y almacenamiento temporal de los residuos con el objetivo de proteger los elementos de la estructura ecológica principal y prevenir la contaminación sobre los recursos naturales aire, agua y suelo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021; Secretaría Distrital de Ambiente & Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2021).

El suelo, componente vital del ambiente natural, dispensable y determinante para la estructura y el funcionamiento de los ciclos del agua, aire y nutrientes, así como para la biodiversidad, se ha convertido en uno de los recursos más vulnerables del mundo frente al cambio climático y la degradación, procesos que alteran la calidad del suelo y por ende propiedades físicas y químicas como la materia orgánica, carbono orgánico, pH, conductividad eléctrica, disponibilidad de nutrientes como fósforo, nitrógeno y potasio, densidad aparente, densidad real y porosidad, que desencadenan la pérdida de funciones naturales y servicios ecosistémicos esenciales como el almacenamiento y retención de carbono , en cuanto un suelo saludable almacena más carbono que la atmósfera y la vegetación (FAO & MADS, 2018; Lefèvre et al., 2017; Marchevsky et al., 2018; Potisek Talavera et al., 2010).

Ante esto y siguiendo el ideal establecido por el Premio Nobel de la Paz, Rattan Lal “*Recuperar el suelo degradado es la mejor forma de mitigar el cambio climático*” , Navas Ríos, (2006) establece que resulta necesario hacer uso de las técnicas existentes de recuperación de suelos con el objetivo de conservar, mejorar y recuperar las características físicas y químicas del suelo que son necesarias para su sustentabilidad, tal como la aplicación de biosólidos como un tipo de enmienda orgánica, debido que de acuerdo con Maechevsky et al., (2018) y Potisek Talavera et al., (2010) este sustrato es rico en materia orgánica (60 a 70%) y en nutrientes indispensables para el crecimiento de las plantas llegando a incrementar la concentración de N , P , K y C con consecuencias positivas en el secuestro y estabilización física y química de este último elemento, lo cual permitiría recuperar en gran medida los servicios ecosistémicos de regulación y soporte proporcionados por el suelo (FAO, 2021).

Cabe destacar que la implementación de esta técnica de recuperación de suelos no es novedosa, de hecho en varios países como en España se han desarrollado investigaciones orientadas hacia el

efecto de la aplicación de este sustrato sobre suelos de uso agrícola para el secuestro de carbono a corto plazo (6 meses), la recuperación de propiedades bioquímicas producto de la aplicación de biosólidos como enmienda del suelo; en México han fomentado la aplicación del sustrato sobre el suelo y su efecto en los contenidos de materia orgánica y nutrientes; y en Colombia, se ha realizado la evaluación del efecto de la aplicación de biosólidos sobre las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar (Fernández et al., 2009; Peñarete M et al., 2020; Potisek Talavera et al., 2010; Soriano-Disla et al., 2010)

Sin embargo, la investigación del uso de biosólidos utilizados para la recarbonización y recuperación de suelos de una planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición es limitada, puesto que solo se ha hecho el análisis del efecto de los biosólidos como estrategia de revegetación de canteras explotadas para la extracción de caliza a nivel mundial Smith & McGuire, (1998) y la evaluación del efecto de la aplicación de biosólidos como enmienda orgánica en la recuperación de un suelo disturbado por actividad extractiva en la cantera de Soratama, Bogotá-Colombia Guacaname & Barrera, (2007). Por tal razón, este proyecto pretende evaluar la eficiencia del tratamiento de biosólidos en condiciones ex situ sobre suelos en la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición- RCD (Usaquén- Bogotá D.C.) como estrategia de recarbonización y recuperación.

1. Planteamiento del problema

La desertificación, la degradación del suelo y la sequía son grandes amenazas que afectan a millones de personas en todo el mundo, en particular a mujeres y niños (Dickinson, 2019). De acuerdo con Bozkir, (2021) cada año se pierden más de 12 millones de hectáreas a causa de las tres grandes amenazas del suelo, perjudicando así a más de 3.000 millones de personas especialmente las comunidades pobres y rurales del mundo en desarrollo.

Para el año 2016 según FAO & GTIS, (2015) el 33% de los suelos a nivel mundial estaban de moderada a altamente degradados debido a la erosión, salinización, compactación, acidificación y contaminación química, los cuales son el resultado de factores naturales y antrópicos que activan y desencadenan procesos que generan cambios negativos en las propiedades del recurso (Minambiente, 2016). Entre los factores directos que inciden en este fenómeno se encuentran los naturales que incluyen el clima, recursos hídricos, características edáficas, relieve y cobertura, y los de tipo antrópico que están relacionados con los tipos de uso y de manejo (Minambiente, 2016).

La degradación de los suelos puede dividirse en física, química y biológica (Minambiente, 2016). La degradación física consiste en la pérdida físico-mecánica del suelo a causa del agua, viento o por acción humana (deforestación, quema, sobreutilización, entre otros), la degradación química está asociada a la pérdida de nutrientes y a su desbalance en el suelo, cambios indeseables de pH y a la contaminación, por último, la degradación biológica está relacionada con la pérdida de materia orgánica (MOS) siendo el carbono orgánico (COS) su principal componente y la biota del suelo (Minambiente, 2016).

Los suelos representan el mayor reservorio de carbono orgánico terrestre (COS), sin embargo, como se observa en la Figura 1 este recurso a nivel mundial se encuentra en una condición pobre a excepción de América del Norte y el Sudoeste del Pacífico que cuenta con una condición regular, donde la pérdida de COS tiende a ser variable en el Sudoeste del Pacífico, Asia, Europa y Eurasia; empeora en América Latina y el Caribe, Cercano Oriente y Norte de África y África al Sur del Sahara, pero mejora en América del Norte, afectando de manera negativa no solo la salud del suelo y la producción de alimentos, sino que también empeora el cambio climático, debido a que cuando

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

se descompone la materia orgánica del suelo (MOS) y se emiten gases de carbono de efecto invernadero a la atmósfera a tasas muy altas, los suelos pierden su capacidad inherente para secuestrar carbono y mitigar estas emisiones (FAO, 2017, 2020).

Figura 1. Pérdida de carbono orgánico del suelo a nivel mundial

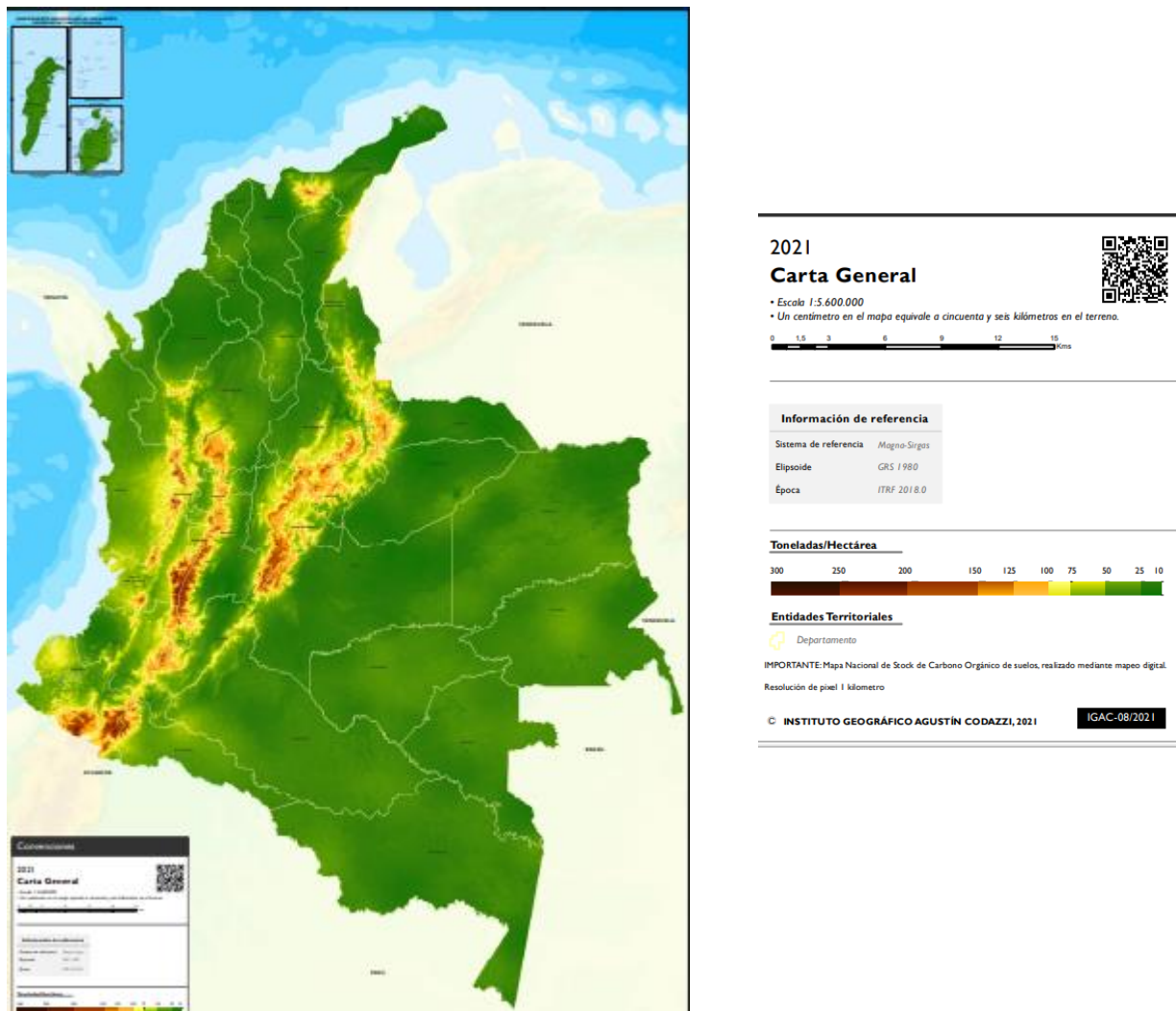


Fuente:(FAO, 2017)

En el año 2015 con el informe técnico del Estado Mundial del Recurso Suelo, se logró evidenciar que en América Latina y el Caribe el cambio climático y la presión humana son los principales factores impulsores de la degradación del suelo en la región, que no solo afecta la regulación del clima sino también implica la pérdida de biodiversidad y resiliencia del suelo, y el incremento de la vulnerabilidad de los asentamientos humanos a las perturbaciones naturales; así mismo, las características culturales y humanas como las prácticas agrícolas inadecuadas que abarcan una serie de procedimientos como la deforestación, quema de bosques y sobrepastoreo juegan un papel importante en la pérdida de carbono orgánico del suelo (COS) (FAO & GTIS, 2015).

A nivel nacional para el año 2017 se desarrolló el Mapa Nacional de Stock de Carbono Orgánico de Colombia (Figura 2), mediante la metodología de mapeo digital de suelos propuesta por la FAO mediante la Alianza Mundial por el Suelo (Camacho et al., 2021). El mapa elaborado es el resultado del análisis de la información de los suelos de cada uno de los 32 departamentos que integran el territorio colombiano, los cuales fueron recopilados entre los años 1980 y 2012 (Camacho et al., 2021).

Figura 2. Stock de Carbono Orgánico de Suelos, Colombia



Fuente:(FAO, 2017)

El Mapa de Carbono Orgánico indica que la región Andina es la más rica en este componente, mientras que en la Caribe se registraron valores bajos en su mayoría relacionados con el uso inadecuado de los suelos (IGAC, 2017). De acuerdo con el director general del IGAC Juan Antonio Nieto Escalante, “esta fotografía es un hallazgo trascendental para el país, debido a que las zonas con mayor concentración de carbono orgánico, en especial la región Andina, resultan ser las que albergan grandes desarrollos agrícolas y pecuarios con problemas de sobreutilización en ciertas zonas” (IGAC, 2017).

Así mismo, Nieto Escalante afirma que al contar con impactos antropogénicos como la deforestación, el cambio de uso y la erosión, estos suelos ricos en COS se pueden convertir en fuentes de Gases de Efecto Invernadero (GEI) como dióxido de carbono y metano (IGAC, 2017). Por otro lado, el subdirector de Agrología del IGAC, Germán Darío Álvarez complementó indicando que cuando un bosque es talado para dar paso a cultivo o ganado se libera carbono a la atmósfera, es decir que “el uso inadecuado del suelo en Colombia, el cual cubre cerca del 28%, es un factor de calentamiento global. Cuando se somete un suelo a procesos de labranza intensiva y sin prácticas de manejo, el contenido de carbono se va perdiendo, su capacidad productiva disminuye y se degradan” (IGAC, 2017).

Es así como la opción de RECSOIL (Recarbonización de los Suelos del Mundo) surgida en la 23ª Conferencia de las Partes (COP 23) del Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) que constituye una herramienta de implementación para escalar el manejo sustentable de los suelos centrado en el carbono orgánico con base en esfuerzos colaborativos en el marco de la Alianza Mundial por el Suelo, puede ser una solución sostenible al problema enmarcado en la pérdida de COS en los suelos del país, estableciendo como principales prioridades y múltiples beneficios a nivel social, ambiental y económico (FAO, 2020):

- a) Impedir posteriores pérdidas de COS de los suelos ricos en carbono (turberas, suelos negros, permafrost, etc.) y donde existe potencial de aumentar las reservas del COS (suelos agrícolas y degradados) (FAO, 2020).
- b) Mejorar los ingresos de los agricultores al aumentar la productividad del suelo (FAO, 2020).
- c) Contribuir a mejorar la seguridad alimentaria y la nutrición (FAO, 2020).
- d) Mitigar el cambio climático (FAO, 2020).
- e) Aumentar la Responsabilidad Social de las empresas en todos los sectores económicos (FAO, 2020).

2. Pregunta de investigación

¿El uso de biosólidos sobre suelos de la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición -RCD Usaquén- Bogotá en condiciones ex situ podrían contribuir a su recarbonización y recuperación?

3. Justificación

El suelo, sistema complejo y dinámico constituye un componente fundamental del ambiente, que cumple múltiples funciones vitales para la supervivencia humana, además hace parte de la diversidad natural y biológica, está compuesto por minerales, agua, aire y organismos vivos, convirtiéndose en un recurso indispensable y determinante para la estructura y funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos así como para la biodiversidad (Minambiente, 2016).

Como parte de las funciones naturales y servicios ecosistémicos provistos por el suelo se destacan: la producción de alimentos, filtrado e intercambio de gases, depuración de la contaminación, regulación hídrica, reciclaje de nutrientes y regulación climática (Minambiente, 2016). Un suelo saludable almacena más carbono que el almacenado en la atmósfera y en la vegetación en conjunto a través de los mecanismos de estabilización de la materia orgánica del suelo, gracias a esto el carbono orgánico (COS) puede permanecer secuestrado durante miles de años, sin embargo, el uso insostenible entre otras actividades antrópicas ocasiona su degradación lo cual resulta preocupante por el efecto negativo sobre ecosistemas, organismos y comunidades humanas (FAO, 2020; Minambiente, 2016).

Un ejemplo de actividad antrópica que degrada el suelo durante las etapas de generación, transporte y disposición final es el sector económico de la construcción, que si bien en la actualidad se ha consolidado como uno de los pilares más importantes de la economía colombiana desde la contribución al PIB representando alrededor del 5,3% del PIB nacional, en la generación de empleo a más de 2 millones de personas, inversiones de más de 20 mil millones de dólares, entre otros aportes de carácter positivo para el crecimiento económico del país y del distrito capital, al finalizar

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

cada una de sus fases genera los llamados residuos de construcción y demolición (RCD) (OIKOS. Constructora, 2023). Estos residuos sólidos provenientes de las actividades de excavación, construcción, demolición, reparaciones o mejoras locativas de obras civiles, pueden llegar a generar impactos ambientales como la contaminación de los recursos de agua, suelo y aire, perturbación de ecosistemas estratégicos y afectación a la salud pública si no se les otorga el correcto tratamiento y disposición final (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. & Secretaría Distrital de Ambiente, 2023; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

No obstante, en Bogotá D.C. a través de la Resolución 472 de 2017 modificada por la Resolución 1257 de 2021 expedidas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible donde se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición, las obligaciones de generadores, gestores, municipios, distritos y autoridades ambientales competentes, así como las metas de aprovechamiento de RCD en función de los municipios, fomenta el funcionamiento de las plantas de tratamiento de residuos de construcción y demolición (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017, 2021). Sin embargo, estos centros de acopio aportan a la disminución del efecto provocado por la incorrecta gestión de los residuos, pero generan el proceso de degradación de los suelos debido al tránsito frecuente de maquinaria pesada, la creación de zonas de recepción y descargue, patio de clasificación, zona de rellenos y patio de acopio (Arango Salas & Forero Higuera, 2019).

De acuerdo con Laureda et al., (2016) uno de los problemas que se genera con la sistematización es la pérdida de estabilidad estructural del suelo, el cual a largo plazo y entre más frecuente sea transitado el sustrato, modificará progresivamente propiedades físicas como la densidad aparente, porosidad y retención de humedad principalmente. Así mismo, en las zonas de relleno y patio de acopios se presenta la aglomeración de carbonato de calcio procedente de la acumulación de lodos de piedra en la superficie del suelo que reducen la fertilidad del recurso debido a los cambios en los valores de pH, CE (Conductividad eléctrica), salinidad, disminución relación C/N, pérdida de materia orgánica del suelo y disminución en las reservas de carbono y nitrógeno (Al-Joulani, 2008; Shrestha & Lal, 2011).

En consecuencia, teniendo en cuenta que el suelo se ha convertido en uno de los recursos más vulnerables del mundo frente al cambio climático, los procesos de degradación y la pérdida de biodiversidad, el presente proyecto articuló la ideología de prácticas de Manejo Sustentable del Suelo (MSS) centradas en el Carbono Orgánico del Suelo (COS), las acciones de RECSOIL (Recarbonización de los Suelos del Mundo) y el papel del ingeniero ambiental como profesional en el área de conocimiento y sujeto responsable de velar por el bienestar de las comunidades, recursos naturales y seres vivos, a través de la implementación de proyectos innovadores que atiendan las necesidades del presente para otorgar un futuro prometedor y sostenible, teniendo en cuenta el crecimiento y desarrollo económico, calidad de vida de los habitantes, gestión adecuada de los recursos naturales y las amenazas recientes provocadas por el cambio climático y el dinamismo que esto genera sobre las tres esferas del desarrollo sustentable; con el objetivo de implementar los biosólidos como estrategia de recarbonización y recuperación sobre suelos en la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición- RCD .

De igual manera, con la presente investigación se contribuye a la “Estrategia nacional de compensaciones ambientales” fomentada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible y al cumplimiento de metas específicas de tres Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El número 12 “Consumo y producción sostenible” se aporta en la meta 12.5. Reducir sustancialmente la generación de residuos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización; el número 13 “Acción por el clima” en la meta 13.2. Integrar medidas de cambio climático; y por

último, el objetivo número 15 “Vida de ecosistemas terrestres” en donde se aporta a la meta 15.3. Detener la desertificación y restaurar las tierras degradadas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Evaluar la eficiencia del tratamiento de biosólidos en condiciones ex situ sobre suelos en la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición- RCD (Usaquén- Bogotá D.C.) como estrategia de recarbonización y recuperación.

4.2. Objetivos Específicos

1. Diagnosticar las condiciones iniciales del suelo y de los biosólidos, a través de la caracterización física y química.
2. Diseñar un prototipo ex situ para monitorear el proceso de recarbonización y recuperación de suelos bajo condiciones controladas.
3. Comparar la eficiencia de las dosis del tratamiento de biosólidos sobre los procesos de recarbonización y recuperación de algunos indicadores de calidad del suelo como alternativa sostenible.

5. Marco de referencia

5.1. Estado del arte

La búsqueda bibliográfica se realizó en diferentes bases de datos como se especifica en la sección de metodología, empleando palabras clave para así seleccionar investigaciones que demuestran los beneficios directos e indirectos de los biosólidos como estrategia de recarbonización y recuperación de suelos de plantas de residuos de construcción y demolición, teniendo también en cuenta suelos de uso agrícola y explotados por minería a cielo abierto.

La información que se muestra a continuación permite argumentar el desarrollo de la pregunta de investigación. haciendo especial énfasis en documentos que se encuentran a nivel internacional, seguido de los presentes en Norte América, luego en Latinoamérica y por último a nivel nacional. Cabe destacar que serán presentados en orden cronológico iniciando con el más contemporáneo para finalizar con el más antiguo.

Internacional

En el año 2018 el artículo titulado *“Soil fertility effects of repeated application of sewage sludge in two 30-year-old field experiments”* de los autores Börjesson & Kätterer, realizaron la aplicación de biosólidos estabilizados anaeróbicamente y deshidratados cada cuatro años sobre suelos de uso agrícola durante treinta años en las ciudades de Igelösa y Petersburgo ubicadas en Suecia, con el objetivo de identificar los efectos a largo plazo de los biosólidos sobre los parámetros físicos y químicos del suelo (Börjesson & Kätterer, 2018). Esta investigación mostró un aumento de 4 a 4,8 Mg/ha de carbono orgánico del suelo (COS) representando un cambio entre el 32 al 74% de contenido comparado con el inicial, así mismo, en la ciudad de Petersburgo el porcentaje de nitrógeno total varió entre un 3,1 a 4,8% mientras que en Igelösa cambió entre 2,4 a 5,5% (Börjesson & Kätterer, 2018). Por último, los valores de densidad aparente disminuyeron a números

de 1,59 Mg/m³ y 1,56 Mg/m³ mostrando un cambio significativo debido a que los valores iniciales del suelo sin tratamiento en este parámetro eran de 1,68 Mg/m³ (Börjesson & Kätterer, 2018).

Para el 2017 el artículo titulado *“Labile organic carbon fractions after amendment of sandy soil with municipal sewage sludge and compost”* desarrollado por Kalisz et al., (2017) en la ciudad de Olsztyn en Polonia, mostró que durante tres años la aplicación de biosólidos a una dosis baja de 30-60 y 90 T/ha a comparación del suelo control (0 T/ha) el carbono orgánico del suelo disminuye de un valor inicial de 17945 Kg/ha a concentraciones como 17488 Kg/ha, 17412 Kg/ha y 16948 Kg/ha respectivamente debido a la rápida mineralización de la materia orgánica. No obstante, en los suelos con mayor dosis de biosólidos (120 y 150 T/ha) el carbono orgánico del suelo aumenta a 20993 Kg/ha y 18324 Kg/ha respectivamente (Kalisz et al., 2017).

En el año 2013 el artículo titulado *“Sewage sludge application in Mediterranean Agricultural soils: Effects of Dose on the soil carbon cycle”* llevado a cabo en Madrid, España por González-Ubierna et al., se evalúa durante dos años el efecto de la aplicación de biosólidos aeróbicos y anaeróbicos sobre el ciclo del carbón del suelo en agroecosistemas semiáridos (González-Ubierna et al., 2013). Durante el transcurso del proyecto, se evidenció que al inicio de este disminuyen en 1,3 unidades los valores de pH y aumenta la conductividad eléctrica en 0,5 dS/m, en los tratamientos que presenta mayor dosis de biosólidos, de igual manera, el carbono orgánico del suelo presentó un incremento proporcional al inicio del proyecto pero luego de dos años se reduce alcanzando un máximo de 160 Mg/ha después de un año de aplicación de la enmienda (González-Ubierna et al., 2013).

Para el año 2010 en el artículo titulado *“Contribution of a sewage sludge application on the short-term carbon sequestration across a wide range of agricultural soils”* desarrollado por Soriano-Disla et al., en Alicante, España se muestra que en seis meses a través de la metodología “column study” (sección de metodología) y controlando variables como la temperatura ambiente, humedad y constancia de riego se logra aumentar el carbono orgánico del suelo (COS) sobre suelos de uso agrícola en valores de $1,7 \pm 1,6$ g de COS kg⁻¹ a 3,8g COS kg⁻¹ (Soriano-Disla et al., 2010). Así mismo, a través de la aplicación del coeficiente de Pearson los autores determinaron que propiedades químicas como el pH, la conductividad eléctrica y el porcentaje de nitrógeno total guardan una estrecha correlación con la variable de carbono orgánico del suelo, debido a que mostraron valores de coeficiente de 0,328, 0,185 y 0,911 respectivamente, siendo el nitrógeno la variable que tiene una relación lineal con el COS. (Soriano-Disla et al., 2010).

En el año 2009 el artículo titulado *“Biochemical properties and barely yield in a semiarid Mediterranean soil amended with two kinds of sewage sludge”* de los autores Fernández et al., llevado a cabo en Toledo, España se realizó durante tres años la aplicación de biosólidos compostados y aireados térmicamente sobre suelos de uso agrícola (Fernández et al., 2009). La investigación mostró un aumento de pH pasando de un valor de 5,7 a 6,5, además, en los suelos con mayor aplicación de dosis aumentó la conductividad eléctrica de 0,05 dS/M a un rango de 0,07 a 0,29 dS/m, la concentración de carbono orgánico del suelo, nitrógeno total y fósforo disponible cambiando de 7,2 g/kg a valores como 17 y 31 g/kg, de 0,9g/kg a 1,7 y 4,5 g/kg y de 0,09g/kg a 0,18 y 0,58 g/kg, respectivamente (Fernández et al., 2009).

Norte América

Para el año 2009 el artículo titulado *“Soil carbon sequestration resulting from long-term application of biosolids for land reclamation”* de los autores Tian et al., desarrollado en Chicago, Estados Unidos evaluó la eficiencia de la aplicación de biosólidos durante 33 años como estrategia de recuperación de suelos explotados por minería a cielo abierto, luego usados para el desarrollo de

agricultura y posterior pastoreo excesivo (Tian et al., 2009). La investigación mostró que la concentración de carbono orgánico del suelo se incrementó hasta valores de 1400 a 1700 Mg/ha mostrando una tasa de 42-49 Mg/ha por año, dando a entender que el tratamiento con biosólidos es una estrategia de captura, almacenamiento y secuestro de carbono orgánico (Tian et al., 2009).

Latinoamérica

En el año 2015 el artículo titulado “*Carbon sequestration and greenhouse gases emissions in soil under sewage sludge residual effect*” de los autores Pitombo et al., demostraron en la ciudad de Sao Paulo, Brasil que la aplicación de biosólidos sobre suelos de uso agrícola durante 7 años pueden ser considerados como un método de secuestro de carbono incluso bajo condiciones tropicales (Pitombo et al., 2015). La investigación mostró un aumento en la concentración de COS del 79%, 56% y 7% en las menores dosis de biosólidos, mientras que en las réplicas de mayor dosis se obtuvo hasta un 163%, 121% y 22% mayor al suelo control; así mismo, a través del coeficiente de Pearson los autores establecieron que el porcentaje de nitrógeno total mostró un alto valor de correlación ($r= 0,996$) indicando una relación lineal debido a que presentó el mismo comportamiento del COS aumentando de un 60% a 68% en los tratamientos con menor dosis mientras que en los de mayor dosis aumentó hasta un 174% y 118% (Pitombo et al., 2015).

Por otro lado, afirmaron que la temperatura edáfica depende de la mineralización de la materia orgánica puesto que entre mayor disponibilidad exista de este constituyente orgánico, los cambios en la temperatura serán más abruptos, mostrando una relación lineal; finalmente, identificaron disminución en los valores de densidad aparente cambiando de magnitudes como de 1,17 g/cm³ a 1,08 g/cm³ en secciones con menor dosis y a números como 1,07 g/cm³ en réplicas con una dosis mayor (Pitombo et al., 2015).

Para el año 2010 el artículo titulado “*Aplicación de biosólidos al suelo y su efecto sobre contenido de materia orgánica y nutrimentos*” de Potisek Talavera et al., mostró que a través de la implementación de la metodología de columnas desarrollada también por Soriano-Disla et al., (2010), en seis meses, la aplicación de biosólidos sobre suelos de uso agrícola mejoraran algunos de los parámetros de calidad del suelo (Potisek Talavera et al., 2010). Esta investigación desarrollada en Durango México establece que el tratamiento aumenta en 0,93%, 1,44% y 1,09% los porcentajes de materia orgánica, además, incrementa los valores de nitrógeno total, alcanzando porcentajes de hasta 50% en las réplicas con mayor dosis de biosólidos; finalmente confirmaron, que los valores de fósforo disponible pueden llegar a niveles mayores a los 200 ppm enseñando una apreciable significancia estadística (Potisek Talavera et al., 2010).

Colombia

En el año 2020 el artículo titulado “*Efecto de la aplicación de biosólidos sobre las propiedades físicas del suelo cultivado con caña de Azúcar*” desarrollado por Peñarete M et al., en la ciudad de Cali, Colombia mostró que la aplicación de biosólidos sobre suelos de uso agrícola durante un año, si bien no genera una variación exuberante en los valores de las propiedades físicas como densidad aparente, porosidad y estabilidad de agregados, si los mejora (Peñarete M et al., 2020). Para la densidad aparente no hubo mayor cambio puesto que pasó de 1,33 g/cm³ a valores dentro del rango de 1,28 g/cm³ a 1,33 g/cm³ teniendo en cuenta que a mayor dosis de biosólidos menor será la magnitud del parámetro debido que al aumentar los contenidos de materia orgánica los valores de densidad aparente disminuyen (Peñarete M et al., 2020).

En cuanto a la porosidad, los autores afirman que no hubo cambios debido a que esta propiedad física ocurre gradualmente en periodos muy largos y dado el tiempo de la investigación no fue posible visualizar cambio alguno, además está en función de factores climáticos, edáficos y de

manejo del suelo; pero en lo que concierne a la estabilidad estructural se identificó que los biosólidos aportan materia orgánica en la formación y aumento del tamaño de los agregados, lo cual se refleja en los valores de diámetro medio ponderado que pasó de 2,65mm a valores dentro del rango de 2,93mm a 3,25mm (Peñarete M et al., 2020).

Durante el año 2007 la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) y la Pontificia Universidad Javeriana, establecieron un convenio de asociación No.017 de 2003 con el objetivo de desarrollar trabajos de grado y procesos de capacitación relevantes para la zona rural y urbana de Bogotá D.C. relacionados con la estrategia de restauración ecológica como insumo para la formulación de políticas, programas y proyectos en el marco del plan de gestión ambiental.

Como fruto de esta asociación surgió el artículo titulado *“Efecto de la aplicación de biosólidos, como enmienda orgánica, en la recuperación de un suelo disturbado por actividad extractiva en la cantera de Soratama, Localidad de Usaquén, Bogotá”* de los autores Guacaname & Barrera, los cuales plantearon como objetivo evaluar durante nueve meses el efecto de la aplicación de biosólidos en la recuperación de las propiedades físicas y químicas de un suelo disturbado por actividad extractiva, y a su vez, comparar el grado de recuperación de los diferentes tratamientos con los suelos instaurados como control (Guacaname & Barrera, 2007). Para ello, efectuaron un diseño experimental de una vía con tres niveles y tres repeticiones más el control, para un total de doce parcelas (c/u 18m²) dispuestas al azar en el terreno (Guacaname & Barrera, 2007). Como resultado, obtuvieron que al adicionar los biosólidos como enmienda orgánica, se incrementan los valores de pH en aproximadamente 2 unidades cambiando del rango de 4,6-5,5 a 6,6-7,8 con una tendencia decreciente en el tiempo, así mismo, se presentó un incremento significativo en la conductividad eléctrica proporcional a la dosis de biosólido agregada puesto que varió de 0,13 dS/m a 5 dS/m como valor límite en la réplica con mayor dosis (Guacaname & Barrera, 2007).

También se identificó un incremento en el porcentaje de carbono orgánico del suelo proporcional a la dosis, mostrando una tendencia creciente al aumentar el tiempo; ante esto en el tratamiento 1 el porcentaje de COS pasó de 0,09 a 0,2%, en el tratamiento 2 se elevó hasta 0,5% mientras que en el 3 se incrementó hasta 0,9% casi 1 unidad de porcentaje más que en el suelo control (Guacaname & Barrera, 2007). De igual manera la capacidad de intercambio catiónico se elevó significativamente respecto a la dosis de biosólido cambiando de 0,95 meq/100 a 4 meq/100; así mismo, el fósforo disponible sobrepasó el valor de 88,3 ppm mostrando un cambio abrupto frente al suelo control donde la magnitud era menor a 15 ppm; no obstante, el porcentaje de nitrógeno total no experimentó gran variación pues en el tratamiento de mayor dosis solo cambió de 0,003% a 0,15% (Guacaname & Barrera, 2007).

En cuanto a las propiedades físicas, los autores registraron la disminución de la densidad aparente probablemente por la integración del biosólido con la fracción mineral, alterando la magnitud de este parámetro de 1,60 g/cm³ a 1,20 g/cm³ y de manera inversamente proporcional el valor de la porosidad de 35% a 50% aproximadamente; finalmente el porcentaje de humedad del suelo aumentó debido a la humedad del biosólido siendo esta mayor en las réplicas con mayor dosis, elevando el porcentaje hasta un 25% (Guacaname & Barrera, 2007).

5.2.Marco teórico

Este marco se realiza con el fin de establecer las bases teóricas claves para comprender el enfoque con el que se desarrollará el presente proyecto.

5.2.1. ¿Cuál Resolución colombiana permite el aprovechamiento y disposición final de los residuos de construcción y demolición- RCD?

La Resolución 1257 de 2021 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición (RCD), define los mecanismos para la efectiva gestión, aprovechamiento y disposición final de los RCD, las obligaciones de generadores, gestores, municipios, distritos y autoridades ambientales competentes, así como las metas de aprovechamiento de RCD en función de la categoría de los municipios (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 1257 de 2021).

Además, en su artículo 8° dispone de las condiciones para la separación y almacenamiento temporal de RCD, definiendo las áreas mínimas para la operación de puntos limpios, mediante el artículo 9° establece las condiciones para el aprovechamiento de RCD, que debe realizarse en plantas de aprovechamiento fijas o móviles (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 1257 de 2021). Así mismo, se procedió a evaluar la capacidad actual de los gestores, generadores, departamentos, municipios, distritos, autoridades ambientales competentes y demás actores relacionados con la gestión integral de los RCD en los diferentes ámbitos territoriales, con el fin de determinar la disponibilidad de infraestructura y tecnología requeridas para la implementación de lo previsto en la resolución (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 1257 de 2021).

Por último, producto de dicha evaluación, se determinó la necesidad de ampliar los mecanismos para la promoción efectiva del aprovechamiento de los RCD bajo un enfoque de economía circular, definir metas respecto a la responsabilidad de los generadores para el manejo y disposición de los RCD (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 1257 de 2021).

5.2.2. ¿Cuáles son los impactos a nivel social, económico y ambiental generados por los residuos de construcción y demolición- RCD en Colombia-Bogotá?

Los residuos de construcción y demolición -RCD generados por la obras a nivel nacional y distrital no está siendo utilizados de manera adecuada en las etapas de generación, transporte y disposición final, generando afectaciones ambientales, económicas y sociales debido al incumplimiento de la normatividad (Becerra Hinestroza, 2019). Estos impactos principalmente se producen sobre la Estructura Ecológica Principal que conlleva a una pérdida de los ecosistemas por la contaminación que se presenta sobre los recursos naturales aire, agua, suelo, la cual provoca riesgos para la salud de la población (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. & Secretaría Distrital de Ambiente, 2023).

Actualmente el distrito capital tiene como meta controlar 32 millones de toneladas de RCD debido a que son un factor de deterioro ambiental y paisajístico para la ciudad (Secretaría Distrital de Ambiente & Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2021). Su inadecuado manejo genera pérdida de ecosistemas estratégicos, contaminación de recursos naturales y generación riesgos para la salud de la población por la generación de lixiviados; así mismo, la mezcla de materiales peligrosos con RCD, la afectación a fuentes hídricas y los suelos pertenecientes a las áreas de las escombreras donde se depositan estos tipos de residuos, y la generación de material particulado que disminuye la calidad de aire de la ciudad y perjudica de manera directa la salud de los habitantes (Secretaría Distrital de Ambiente & Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2021).

5.2.3. ¿Qué impactos generan los residuos de construcción y demolición sobre el recurso suelo?

Debido que para el funcionamiento de la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición-RCD es necesaria la presencia de maquinaria pesada como lo son báscula vehicular fija, retro cargador de llantas, montaje de trituradora, Volquetas y Bulldozer para llevar a cabo los procesos de recepción y descargue, patio de clasificación, zona de rellenos y patio de acopio, se genera la compactación del suelo que de acuerdo con Hughes- DeJong et al., (2018) es el efecto de “empaque” de una fuerza mecánica sobre el suelo (Ávila Galeano, 2018). Este efecto disminuye el volumen ocupado en relación con la textura y contenido de humedad, incrementa la densidad aparente y tensión del suelo (Laureda et al., 2016).

Así mismo, en las áreas donde se llevan a cabo las zona de recepción y descargue, patio de clasificación, zonas de relleno y patio de acopios se presenta la aglomeración de carbonato de calcio procedente de la aglomeración de lodos de piedra en la superficie del suelo lo cual genera la formación de un tipo duro de cemento que evita la infiltración del agua y la adherencia de las raíces de las plantas en la capa del suelo (Al-Joulani, 2008). Estos residuos de lodos reducen la fertilidad de los suelos debido a los cambios en los valores de pH, CE (Conductividad eléctrica), salinidad y el total de los sólidos disueltos (Al-Joulani, 2008).

Con el exceso de calcio en el suelo, se produce la inmovilización de elementos como hierro, boro, zinc y manganeso, generando un aumento del pH que favorece la precipitación de dichos elementos (Shrestha & Lal, 2011). Proporcional a este proceso, la conductividad eléctrica, es decir la concentración de sales disueltas aumenta (Moyeja Santana, 2015; Shrestha & Lal, 2011). Como consecuencia a los anteriores fenómenos, la relación C:N disminuye debido a que si la población microbiana no se adapta al nuevo nivel de basicidad se verá perjudicada y su tasa de muerte aumentará, lo que se traduce en poca mineralización de la materia orgánica del suelo y disminución en las reservas de carbón y nitrógeno (Shrestha & Lal, 2011).

5.2.4. ¿En qué consiste la adición de biosólidos como técnica de recuperación de suelos?

La aplicación de biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales al suelo pueden ser una alternativa de disposición ecológica y económica para mantener la materia orgánica del suelo que requieren los suelos degradados y suplir los nutrientes que requieren las plantas (Elliot & Dempsey, 1991).

Como ejemplo de sus usos se encuentra la aplicación al terreno que consiste en la incorporación de biosólidos al terreno para abastecerlo de nutrientes y renovar la materia orgánica del terreno (EPA. United States Environmental Protection Agency, 2000). Así mismo, la reutilización de biosólidos a través de esta actividad tiene varios propósitos tales como mejorar las características del suelo (textura y capacidad de absorción de agua) que brindan condiciones más favorables para el crecimiento de las raíces e incrementan la tolerancia de la vegetación a la sequía (EPA. United States Environmental Protection Agency, 2000).

Por último, de acuerdo con EPA. United States Environmental Protection Agency, (2000) existen diversos métodos para la aplicación de biosólidos al terreno. La selección del método depende del tipo de terreno y de la consistencia de los biosólidos debido a que pueden ser inyectados al suelo o ser aplicados en la superficie del terreno (EPA. United States Environmental Protection Agency, 2000).

5.2.5. ¿Qué beneficios aportan los biosólidos en el proceso de recarbonización del suelo?

Los biosólidos proveen fertilidad al suelo porque incrementan la materia orgánica presente con posibles consecuencias positivas en el secuestro del carbono orgánico del suelo, estimula el metabolismo microbiano en el recurso y el contenido de nitrógeno y mejora las propiedades físicas y químicas de este (FAO, 2021; Potisek Talavera et al., 2010).

Con respecto a las propiedades físicas reduce la densidad e incrementa la porosidad, mejora la estabilidad de los agregados y disminuye la erosión, así mismo, como resultado del aumento del carbono orgánico del suelo, se obtiene un incremento en la capacidad de retención del agua y en la disponibilidad de esta en suelos de textura gruesa (FAO, 2021; Giraldo & Lozano de Yunda, 2004). En cuanto a las propiedades químicas, la adición de biosólidos ha demostrado que incrementa el pH, la conductividad eléctrica, concentración de nutrientes, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico, además, esta práctica mejora las propiedades biológicas, tales como la biomasa microbiana y actividad enzimática relacionada con los ciclos de C, N y P (FAO, 2021).

La aplicación de biosólidos considerada como una práctica de manejo sustentable del suelo centrada en el COS teniendo en cuenta los beneficios establecidos en la Figura 3 ayuda a que el suelo mejore su fertilidad y la mantenga, aumente la actividad y la diversidad de especies en la biota del suelo, contribuye a reducir el calentamiento global y aporta en el cumplimiento de las metas establecidas para los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 12 “ Producción y Consumo Responsables”, 13 “ Acción por el Clima” y 15 “ Vida de Ecosistemas Terrestres” (FAO, 2020).

Figura 3. Múltiples beneficios provistos por las prácticas de manejo sustentable del suelo con base en el COS



Fuente: (FAO, 2020)

Cabe destacar que la inversión en las prácticas de manejo sustentable del suelo (MSS) centradas en el mantenimiento de las reservas actuales de COS y su posterior secuestro, conlleva a múltiples beneficios en materia de seguridad alimenticia y nutrición, reducción de la pobreza, provisión de servicios ecosistémicos y desarrollo sustentable, como lo muestra la Figura 3, así mismo, es interesante observar que estos esto conduce a muchos co-beneficios y sinergias (FAO, 2020).

5.3. Marco conceptual

En este marco conceptual se presentan los términos esenciales para el desarrollo del proyecto enfocado en el estado actual del recurso suelo perteneciente al antiguo terreno de la cantera “El Ayuelo” y la recuperación de suelos susceptibles a la degradación.

5.3.1. Suelo

La palabra suelo tiene varios significados. “ De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018), el suelo es un componente vital del ambiente, natural y finito, constituido por minerales, aire, agua, materia orgánica, macro, meso y microorganismos que desempeñan procesos fundamentales de tipo biótico y abiótico, cumpliendo funciones indispensables para la sociedad y el planeta”. Además “ según Ortiz Bernard et al., (2007) es un elemento natural dinámico y vivo que constituye la interfaz entre la atmósfera, la litosfera, la biosfera y la hidrosfera, sistemas con los que mantiene un continuo intercambio de materia y energía”

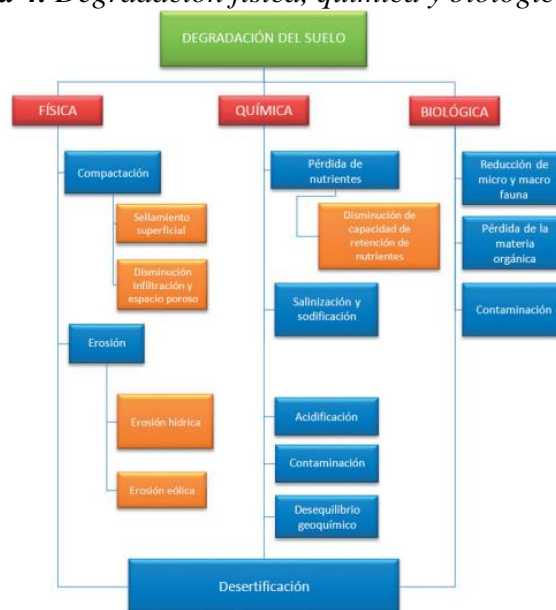
5.3.2. Degradación del Suelo

“Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2016) , la degradación del suelo se refiere a la disminución de su calidad, lo cual implica cambios en las propiedades de este, que afectan negativamente los ciclos biogeoquímicos y en general el funcionamiento de los ecosistemas”.

Así mismo, es el producto de la interacción de factores naturales y antrópicos que desencadenan procesos que generan cambios perjudiciales en las propiedades del suelo (Minambiente, 2016). Entre los factores directos que inciden en la degradación de este recurso se encuentran las naturales que comprenden a el clima, las aguas, las características edáficas, el relieve y la cobertura; y las de tipo antrópico que están relacionadas con el uso y gestión adecuada del suelo (Minambiente, 2016).

Cabe destacar que la degradación de los suelo puede ser de tipo física, química y biológica, como se observa a continuación en la Figura 4 (Minambiente, 2016).

Figura 4. Degradación física, química y biológica del suelo



Fuente:(Minambiente, 2016)

5.3.3. Degradación Física

La erosión es un tipo de degradación física que consiste en la pérdida físico- mecánica del suelo provocada por el agua, el viento o por acciones antrópicas a través de actividades como la deforestación, quema, uso intensivo, entre otros (Minambiente, 2016).

Así mismo, la erosión ocasiona la pérdida de la superficie del suelo y la deformación del terreno por movimientos en masa (deslizamientos, arrastre de los suelos por los ríos); en este proceso se trasladan las capas fértiles del suelo reduciendo así la productividad y en casos extremos ocasionando la desertificación (Minambiente, 2016).

5.3.4. Degradación Química

“De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2016), la degradación química está asociada a la pérdida de nutrientes y a su desbalance en el suelo, a los cambios indeseables de pH y a la contaminación. La pérdida de nutrientes o su desbalance reducen la productividad de los suelos en incluso pueden conllevar a su agotamiento cuando no se restituyen los nutrientes extraídos por las plantas”

5.3.5. Degradación Biológica

Este tipo de degradación está asociada a la pérdida de materia orgánica y biota del suelo, debido a las prácticas agrícolas inadecuadas como la labranza, deforestación, cambios en el uso del suelo sin medidas de conservación y urbanismo sin criterios de sostenibilidad (Minambiente, 2016).

5.3.6. Biosólidos

Como lo menciona EPA. United States Environmental Protection Agency, (2000).

“Los biosólidos son principalmente materiales orgánicos líquidos, sólidos o semisólidos originados después de un proceso mecánico biológico de estabilización de lodos orgánicos provenientes del tratamiento de aguas residuales los cuales pueden ser utilizados en diversos usos beneficiosos”.

La estabilización de los lodos se realiza para reducir el nivel de patógenos, su poder de fermentación y capacidad de atraer vectores (Jaramillo G., 2002). Gracias a este proceso, los biosólidos tienen aptitud para implementarlos en la agricultura, en la producción forestal o para la restauración de suelos degradados (Jaramillo G., 2002).

5.3.7. Recarbonización

Teniendo en cuenta lo establecido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), (2020).

“La recarbonización de los suelos es una serie de prácticas probadas de Manejo Sustentable del Suelo (MSS) centradas en el Carbono Orgánico del Suelo (COS) para mantener las reservas en los suelos ricos en carbono (turberas, suelos, negros, permafrost) y para secuestrar más carbono en los suelos con dicho potencial (suelos agrícolas y degradados), enfocadas principalmente en el desafío de compensar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)”.

5.3.8. Recuperación

Proceso de conversión de tierras perturbadas producto de un historial de uso inadecuado que afectan bienes y servicios del suelo, que tiene como finalidad lograr unos niveles aceptables de salud y calidad del suelo (Sociedad Española de las Ciencias del Suelo, 2018).

5.3.9. Técnicas de recuperación de suelos

Teniendo en cuenta lo establecido en el Informe de Técnicas de recuperación de suelos contaminados (2007).

“Las tecnologías de recuperación de suelos contaminados están diseñadas para aislar o destruir las sustancias contaminantes alterando su estructura química mediante procesos generalmente químicos, térmicos o biológicos”.

Su aplicación depende de las características del suelo y del contaminante, de la eficacia esperada con cada tratamiento, su viabilidad económica y el tiempo estimado para su desarrollo (Ortiz Bernard et al., 2007). Según la forma en la que se apliquen las técnicas de recuperación de suelos se habla de tratamientos *in situ*, que actúan sobre los contaminantes en el lugar en el que se localizan, y tratamientos *ex situ*, que requieren la excavación previa del suelo para su posterior tratamiento, ya sea en el mismo lugar (tratamiento *on site*) o en instalaciones externas que requieran el transporte del suelo contaminado (tratamiento *off site*) (Ortiz Bernard et al., 2007).

5.4. Marco Normativo

A continuación se presenta el marco normativo que rige el siguiente proyecto, teniendo en cuenta la norma, la autoridad que lo expide, de que trata y de qué forma contribuye en el desarrollo de la investigación.

Tabla 1. Marco normativo de importancia para el desarrollo del proyecto

Norma	Autoridad que expide	Descripción	Contribución al proyecto
Decreto 2811 de 1974- Parte VII De la Tierra y los Suelos	Presidencia de la República	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales y Renovables y de Protección al Medio Ambiente (Presidente de la República de Colombia, Decreto 2811 de 1974)	El Código regula el manejo del suelo. Trata del uso no agrícola de la tierra
Ley 9 de 1979	Congreso de Colombia	Por la cual se dictan Medidas Sanitarias (Congreso de Colombia, Ley 9 de 1979)	Título I. De la protección del medio ambiente
Ley 99 de 1993	Congreso de Colombia	Por la cual se crea el	Título IX. De las

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

		Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA (Congreso de Colombia, 1993)	funciones de las entidades territoriales y de la planificación ambiental
Ley 685 de 2001	Congreso de Colombia	Por la cual se expide el Código de Minas (Congreso de Colombia, 2001)	Capítulo XX. Aspectos Ambientales
Ley 388 de 1997	Congreso de Colombia	Ley de Desarrollo Territorial (Congreso de Colombia, 1997)	Promoción del ordenamiento territorial, uso equitativo y racional del suelo con el objetivo de velar por la protección del ambiente
Resolución 0170 de 2009	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Por lo cual se declara en Colombia el año 2009 como año de los suelos y el 17 de junio como Día Nacional de los Suelos y se adoptan medidas para la conservación y protección de los suelos en el territorio nacional (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2009)	Velar por la conservación de los suelos para prevenir y controlar fenómenos como erosión, degradación, etc.
Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015)	Artículo 2.2.1.1.18.6. Protección y conservación de suelos. En relación con la protección y conservación de los suelos.
Política Nacional para la Gestión	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Política GIAS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible,	Aporta a la conservación y uso sostenible del suelo, el cual es un

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

Integral Ambiental del Suelo (GIAS)	2016)	componente determinante de los ciclos del agua, del aire y de los nutrientes e indispensable para la preservación de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos. Así mismo, facilita y orienta la Gestión Integral Ambiental del Suelo en el orden nacional y regional y aporta al desarrollo sostenible del país.		
Decreto de 2014	1287	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio	Por el cual se establecen criterios para el uso de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, Decreto 1287 de 2014)	Artículo 20. Fomento al uso de biosólidos.
Decreto de 2018	2412	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio	Por el cual se adiciona el capítulo 7, al título 2, de la parte 3, del libro 2, del Decreto único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, Decreto 1077 del 26 de mayo de 2015, que reglamenta parcialmente el artículo 88 de la Ley 1753 de 2015, en lo referente al incentivo del aprovechamiento de residuos sólidos (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, Decreto 2412 de 2018)	Incentiva el aprovechamiento y tratamiento de residuos sólidos (IAT) para su implementación en los municipios y distritos, en cuanto a lo establecido en el PGIRS (Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos)
Resolución 1257 de 2021	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por la cual se modifica la Resolución 0472 de 2017 sobre la gestión integral de los Residuos de Construcción y Demolición- RCD	Reglamentación de la gestión integral de los residuos generados en las actividades de Construcción y Demolición – RCD,	

(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021)

definió los mecanismos para la efectiva gestión, aprovechamiento y disposición final de los RCD, las obligaciones de los generadores, gestores, municipios, distritos y autoridades ambientales competentes, así como las metas de aprovechamiento de RCD en función de la categoría de los municipios.

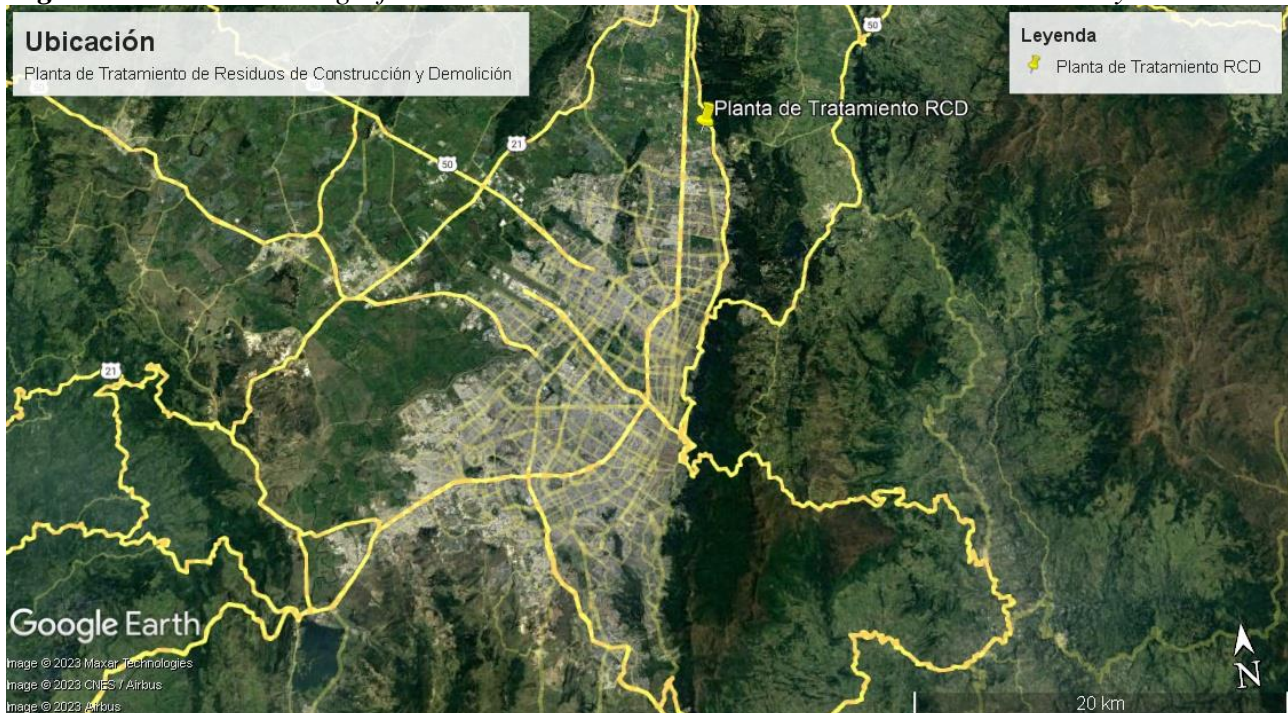
Fuente: Autora, 2023

5.5.Marco geográfico

5.5.1. Ubicación

La Planta de Tratamiento de Residuos de Construcción y Demolición- RCD, se encuentra ubicada en el barrio El Codito, localidad de Usaquén al norte de la ciudad de Bogotá D.C. departamento de Cundinamarca como se observa en la leyenda de la siguiente figura denotada por un símbolo de color amarillo; sus coordenadas son 4°46'33,49" N 74°01'59,46" O.

Figura 5. Ubicación Geográfica Planta de Tratamiento de Residuos de Construcción y Demolición



Fuente: Autora, 2023

Esta planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición -RCD se encarga de transformar los residuos provenientes de construcciones o excavaciones, con el objetivo de venderlos e implementarlos en el mantenimiento de vías, construcción de nuevas edificaciones, entre otros, aportando al cuidado de los ecosistemas de la localidad de Usaquén y al cumplimiento de las metas establecidas en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 12 “Producción y Consumo Responsable” (comunicación personal, 16 de mayo de 2023) .

5.5.2. Geología Estructural

La geometría de la Sabana de Bogotá está comprendida por un sinclinorio en el que las estructuras sinclinales son continuas y amplias; donde se evidencian anticlinales estrechos y deformados debido a las fallas longitudinales de cabalgamiento, acompañados de un diapirismo de sal que provoca zonas de transferencia, desplazamientos laterales y rampas (Ministerio de Minas y Energía et al., 2005).

En el área comprendida por la Sabana de Bogotá se pueden establecer dos estilos estructurales: el primero, ubicado en el flanco oriental de la Cordillera Oriental, al oriente del sinclinal de Checua, así mismo, las fallas principales son de cabalgamiento que presentan vergencia al Oriente; mientras que las otras son de menor importancia y se comportan como retrocabalgamiento con vergencia hacia el occidente (Ministerio de Minas y Energía et al., 2005). Cabe destacar que la localidad de Usaquén se encuentra en la Falla de Bogotá y el Anticlinal de Bogotá (Ministerio de Minas y Energía et al., 2005).

La Falla de Bogotá bordea los cerros orientales de la Sabana (Monserate y Guadalupe) y se extiende desde el Páramo de Sumapaz al sur de la Sabana hasta el norte de la ciudad y probablemente continué más al norte fosilizada por los depósitos cuaternarios (Ministerio de Minas y Energía et al., 2005). Esta falla presenta un rumbo general N10°E y es inversa con vergencia al Occidente, desde el sector de Usme hasta Usaquén, el salto va disminuyendo progresivamente y es así como al sur cabalgan rocas de la Formación Labor-Tierna sobre rocas de la Formación Bogotá (Usme) y luego sobre las formaciones Cacho y Guaduas hasta desaparecer las evidencias de la falla (Ministerio de Minas y Energía et al., 2005).

5.5.3. Relieve

Según IGAC, (2022b) el relieve de la zona de estudio corresponde a mantos de ceniza volcánica sobre depósitos clásticos hidrogénicos, además de ser ligeramente plano a ligeramente inclinado con pendientes de 1-7%.

5.5.4. Clima

De acuerdo con el estudio de caracterización climática de Bogotá realizado por el Instituto de Hidrología y Meteorología IDEAM, la localidad de Usaquén presenta condiciones de humedad que se encuentran en el rango de 500 a 600 mm anuales en la zona más seca, hasta el rango de 800 a 900 mm en el sector Torca (Alcaldía Local de Usaquén, 2021).

Por otro lado, según el informe GEO Local generado por el Instituto de Estudios Ambientales IDEA de la Universidad Nacional de Colombia en el año 2008, la localidad presenta una temperatura promedio anual de 22,2°C siendo esta ligeramente más alta que el promedio de la ciudad (Alcaldía Local de Usaquén, 2021). La temperatura mínima media estuvo por debajo de los 6,1°C promedio, situándose en 5,2°C, que guarda relación posiblemente con los núcleos de condensación que suelen permanecer alrededor del macizo de Torca y sobre los cerros que se

encuentran ubicados entre la localidad de Usaquén y el embalse de San Rafael, situado en el municipio de La Calera (Alcaldía Local de Usaquén, 2021).

5.5.5. Recurso Hídrico

La localidad de Usaquén cuenta con un número importante de fuentes de agua entre las que se destacan la quebrada de Torca, La Floresta, La Cita, San Cristóbal, Delicias del Carmen, Contador, La Chorrera, El Canal Callejas de la Calle 127, además de numerosos drenajes; de igual manera, entre sus límites se encuentra el humedal de Torca que actúa como “esponja” regulando las crecidas del río Bogotá y sus tributarios, además de ser el hábitat de especies endémicas de flora y fauna (Consejo Local de Gestión del Riesgo y Cambio Climático CLGR-CC, 2017).

Cabe destacar que las rondas de las quebradas se han visto afectadas por su intervención antrópica evidenciada por la presencia de residuos sólidos y escombros que además de convertirse en foco de contaminación, obstruyen el curso natural del agua generando un alto riesgo de inundación para estos sectores (Alcaldía Local de Usaquén, 2021). Sin embargo, comunidades como Bosques de Torca y asociaciones como ASOFLORESTA han contribuido para la preservación de las fuentes de agua que por allí transcurren (Alcaldía Local de Usaquén, 2021)


5.5.6. Vocación uso del suelo

De acuerdo con la información obtenida de la página del IGAC, sección Colombia en Mapas; para el año 2016 el área en la que se encuentra ubicada la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición presenta una vocación de uso del suelo agricultura con orientación semi comercial y subsistencia y ganadería extensiva y semi-intensiva para producción de carne, tal como se logra observar en el mapa (IGAC, 2022b).









Figura 6. Mapa Vocación Uso del Suelo, zona de estudio



Leyenda

 Planta de Tratamiento de Residuos de Construcción y Demolición

Vocación Uso del Suelo

-  Agricultura de subsistencia con cultivos transitorios y ganadería extensiva
-  Agricultura de subsistencia con cultivos transitorios y semipermanentes, ganadería extensiva de doble propósito
-  Agricultura intensiva de orientación comercial, ganadería intensiva para producción de leche, con utilización de pasturas
-  Bosque protección-producción
-  Conservación y protección de la flora y fauna silvestre
-  Ganadería semintensiva para producción de leche y agricultura de subsistencia y semicomercial con cultivos transitorios
-  Ganadería semintensiva y extensiva y agricultura de subsistencia con cultivos transitorios
-  Zona urbana

Elaborado por:
Laura Vanessa
Vargas Guerrero
Año 2023



Fuente: Autora, 2023. Modificado de (IGAC, 2022b)

De igual manera, alrededor de la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición-RCD se encuentran la zona urbana correspondiente al distrito capital, áreas utilizadas para el desarrollo de agricultura de subsistencia con cultivos transitorios y semipermanentes, y ganadería semi - intensiva, principalmente (IGAC, 2022b).

5.5.7. Demografía

De acuerdo con la Alcaldía Local de Usaquén, (2021) para el año 2018 la población de Bogotá era de 7.412.566 habitantes y la de Usaquén era de 519.837, que representaba el 7,01% de los habitantes del Distrito Capital, por otro lado, la cantidad de hogares es de 198.789 Un y la cantidad de viviendas 210.531 Un. En la localidad se ha incrementado moderadamente la población y el número de hogares, siendo los sectores de San Cristóbal Norte y El Codito donde se ubica la mayor densidad de la localidad (Alcaldía Local de Usaquén, 2021).

5.5.8. Economía

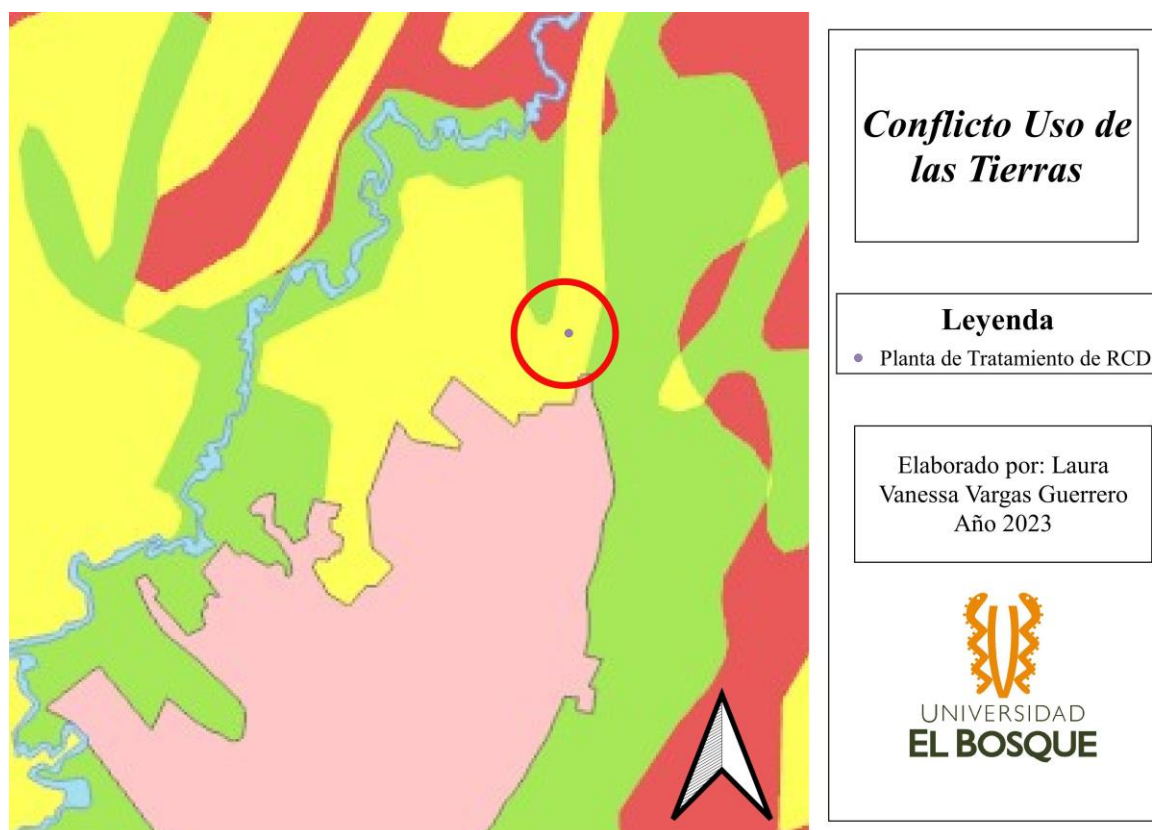
La economía de la localidad está conformada por cuatro grandes componentes:

- **Comercio:** La localidad cuenta con importantes centros comerciales reconocidos: Unicentro, Hacienda Santa Bárbara, Rodero Drive, Santana, Palatino, Cedritos, entre otros; así mismo, en el costado oriental de la Autopista Norte se encuentran establecimientos de los sectores comerciales de ferreterías, colchones, muebles y decoración entre otros (Alcaldía Local de Usaquén, 2021).
- **Agropecuario:** En la UPZ Paseo de Los Libertadores y en pequeñas parcelas ubicadas en las partes altas de las UPZ Verbenal, La Uribe, San Cristóbal Norte y Los Cedros, se cultivan diferentes productos que son comercializados en las tiendas y plazas de mercado de la ciudad (Alcaldía Local de Usaquén, 2021). En la UPZ Paseo de Los Libertadores, además existen haciendas para la explotación de ganado bovino, para la producción de leche, equinos para el uso de caballerizas (Alcaldía Local de Usaquén, 2021).
- **Industrial:** En la UPZ Verbenal se encuentra una planta pasteurizadora de Parmalat, dos fábricas de vino, una fábrica de plaquetas para construcción y una procesadora de maderas; por otro lado, en la UPZ Paseo de Los Libertadores se encuentra una empresa dedicada al suministro de tubería e insumos para la explotación petrolífera, denominada *American Pipe* (Alcaldía Local de Usaquén, 2021).
- **Turístico:** Son reconocidos como centros turísticos de la localidad entre otros, los siguientes: El Club de la Aguadora, la plaza fundacional de Usaquén Centro, la Iglesia Santa Bárbara, el cerro El Escobal, la bocatoma del acueducto y la Plaza de los Artesanos, conocida como Mercado Artesanal *Carpe Diem* (Alcaldía Local de Usaquén, 2021).

5.5.9. Conflicto uso de las tierras en el lugar de estudio

Según la información obtenida en la página del IGAC, sección Colombia en mapas, para el año 2002 el lugar de estudio presentaba un conflicto de uso del suelo de subutilización identificado en el mapa (Figura 7) con el color amarillo, es decir que, su uso actual es muy inferior a la clase de vocación de su uso principal de acuerdo con la mayor capacidad productiva natural (IGAC, 2022b). Esta subutilización se debe a que se restringe severamente el cumplimiento de la función social y productiva de las tierras en la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición y en sus alrededores (IGAC, 2022b).

Figura 7. Mapa Conflicto Uso de las Tierras en el lugar de estudio



Fuente: Autora, 2023. Modificado de (IGAC, 2022b)

Por otro lado, el color rosado simboliza la zona urbana de Bogotá D.C., el color rojo representa la sobreutilización severa del suelo mientras que el color verde hace referencia a un uso adecuado del suelo y sin ningún conflicto (IGAC, 2022b).

5.6. Marco Institucional

A continuación se presentan una serie de autoridades a nivel regional, departamental y municipal, que de una u otra forma participan en la definición y aplicación de lineamientos y políticas orientadas a la consecución de los objetivos establecidos en el presente proyecto.

5.6.1. Universidad El Bosque

Es la institución que incentiva el aprendizaje e investigación y otorga la infraestructura necesaria para el desarrollo de estos. Será el ente encargado de permitir el alcance y cumplimiento de los objetivos propuestos en el presente proyecto.

5.6.2. IGAC

Es la entidad encargada de producir el mapa oficial y la cartografía básica de Colombia, realizar el inventario de suelos con sus características; adelantar investigaciones geográficas como apoyo al desarrollo territorial; capacitar y formar profesionales en tecnologías de información geográfica y coordinar la Infraestructura Colombiana de Datos Especiales (ICDE)(IGAC, 2022a). Además, es la máxima autoridad que regula, produce y articula la información geográfica, catastral y agrícola del

país, con altos estándares de calidad, que contribuyen a la toma de decisiones y definición de políticas públicas (IGAC, 2022a).

5.6.3. CAR

“Según lo establecido por el Congreso de Colombia (1993) en la Ley 99 de 1993, la CAR es un ente corporativo de carácter público, que tiene por objeto la ejecución de las políticas, planes, programas y proyectos sobre el ambiente y los recursos naturales renovables, así como el cumplimiento y oportuna aplicación a las disposiciones legales vigentes sobre su disposición, administración, manejo y aprovechamiento, conforme a las regulaciones, pautas y directrices expedidas por el Ministerio de Ambiente (CAR. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2022)”.

Cabe destacar que esta institución es de gran importancia para el seguimiento y acompañamiento para lograr la recuperación del recurso suelo de la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición-RCD.

5.6.4. Planta de Tratamiento de Residuos de Construcción y Demolición

“Según lo establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017) en la Resolución 472 del 2017, *Artículo 2. Definiciones*, las plantas de aprovechamiento de residuos de construcción y demolición son las instalaciones en las cuales se realizan actividades de separación, almacenamiento temporal, reutilización, tratamiento y reciclaje de RCD (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017)”.

Éstas pueden ser fijas o móviles (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 472 de 2017). Las plantas de aprovechamiento fijas son las instalaciones que operan de manera permanente en un predio determinado, incluye edificaciones, maquinaria y equipo, tal como la que se tiene en cuenta para el desarrollo del presente proyecto; mientras que las plantas de aprovechamiento móviles son las instalaciones transitorias acondicionadas en el sitio de generación, incluye maquinaria y equipo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 472 de 2017).

5.6.5. Alimentos SAS S.A.S.

Alimentos SAS S.A.S, es una empresa perteneciente al sector agroindustrial dedicada al desarrollo, producción y comercialización de pulpas y néctares de frutas, congelados y asépticos de excelente calidad (Alimentos SAS S.A.S, 2022). La institución cuenta con la certificación ISO 22000, KOSHER concepto favorable de la FDA y del INVIMA, donde han sido evaluados los procesos con el objetivo de cumplir con estándares de calidad para el consumidor nacional e internacional (Alimentos SAS S.A.S, 2022). Esta entidad será la encargada de otorgar una muestra de biosólidos provenientes de la PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales) ubicada en la misma empresa, a los cuales se les evaluará la eficiencia como estrategia de recarbonización de los suelos (Alimentos SAS S.A.S, 2022).

5.6.6. Agrilab

Agrilab es un laboratorio especializado en análisis fisicoquímicos para el sector agrícola y ambiental, destacado por la solidez de sus operaciones, la confiabilidad analítica, y por la idoneidad de sus asesorías y acompañamientos técnicos (AGRILAB, 2023). Además, cuenta con acreditación ONAC bajo la norma 17025:2017 y participan de manera continua en ensayos de aptitud interlaboratorio a nivel nacional e internacional, con resultados sobresalientes (AGRILAB, 2023).

6. Metodología

6.1. Método

La presente investigación se desarrolló bajo un método *inductivo*, definido por Sampieri (2014) como un proceso que va de lo particular a lo general es decir se explora y describe para luego generar perspectivas teóricas, en cuanto se quiere comprobar la veracidad de que los biosólidos son una estrategia de recarbonización y recuperación de los indicadores de suelos degradados por la operación de una planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición -RCD a partir del establecimiento de tratamientos a diferentes dosis de este sustrato.

6.2. Enfoque

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque *mixto* debido que se realiza la recolección de datos cuantitativos como el pH, la conductividad eléctrica, materia orgánica y de variables cualitativas como la textura, historial y vocación de uso del suelo, con el objetivo de integrarlas, interpretarlas y discutir la información recolectada para así tener un mayor entendimiento del fenómeno de recuperación de suelos degradados por el funcionamiento de una planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición -RCD (Hernández Sampieri, 2014).

6.3. Alcance

El alcance de esta investigación es exploratorio, descriptivo y correlacional. De acuerdo con lo establecido en el libro de Sampieri “*Metodologías de investigación*” el alcance **exploratorio** hace relación a examinar un tema de investigación poco estudiado o que no se ha abordado antes, es decir, indagar sobre temas y áreas desde nuevas perspectivas; el alcance **descriptivo** se enfoca en especificar propiedades y características de cualquier fenómeno a ser analizado, en otras palabras medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o variables escogidas y su relación (Hernández Sampieri, 2014).

Finalmente, el alcance **correlacional** se refiere a la asociación de variables mediante un patrón predecible, conocer la relación o grado de asociación que exista entre los conceptos a través de la medición individual, su cuantificación y el establecimiento de los vínculos, todo esto con el objetivo de predecir el valor aproximado de una variable a partir del valor que poseen las variables con las que se relaciona (Hernández Sampieri, 2014).

Por lo tanto, la presente investigación titulada “*Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos*” se ajusta a los criterios establecidos en estos tres alcances debido que a nivel nacional, y en específico en la zona de estudio no se han encontrado reportes de investigaciones que hayan realizado la implementación de biosólidos en suelos de residuos de construcción y demolición, adicional a que el eje del proyecto estará enmarcado en la recarbonización y recuperación del suelo, una medida sugerida por los protocolos de la FAO y por el Nobel Rattan Lal frente a una de las grandes amenazas existentes sobre el recurso suelo como es la degradación (FAO, 2021; Shrestha & Lal, 2011).

En cuanto a los alcances descriptivos y correlacional, el presente proyecto pretende a través de la metodología establecida obtener información del estado actual del recurso suelo a partir del análisis en laboratorio de las principales propiedades físicas y químicas, y posteriormente seleccionar los indicadores del suelo, los cuales serán la herramienta fundamental para el realizar el seguimiento de los tratamientos a diferentes dosis de biosólidos que serán manejados como estrategia de recarbonización y recuperación de los impactos generados por la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición sobre el suelo de la zona de estudio (Hernández Sampieri, 2014).

Cabe destacar que la experimentación se llevó a cabo durante los meses comprendidos entre mayo a octubre del año 2023, de manera ex situ bajo condiciones ambientales controladas en las instalaciones de la Universidad El Bosque-Sede Chía, con la aplicación de un tratamiento de biosólidos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de una empresa productora de pulpa de fruta, a dosis de dos kilogramos por kilogramo de suelo y cuatro kilogramos por kilogramo de suelo, con tres réplicas cada uno, y con la medición semanal de variables como el pH, conductividad eléctrica (CE) y temperatura edáfica. Finalmente, se realizó el procesamiento de datos que permitieron generar gráficas de barras, radiales y combinados, así mismo se implementó el coeficiente de Pearson como medida de correlación y de dependencia lineal entre dos variables cuantitativas y la Prueba T-Student para validar o rechazar las hipótesis nula y alternativa planteadas.

6.4. Unidad de análisis

De acuerdo con lo definido por Sampieri (2014) la unidad de análisis es el objeto para medir, a quienes se les aplicará el instrumento de medición. Por lo tanto, la unidad de análisis de la presente investigación es la proporción suelo: biosólido que llevará cada uno de los tratamientos a evaluar (Hernández Sampieri, 2014).

6.5. Técnicas e instrumentos implementados en la recolección de información

Las técnicas e instrumentos son procedimientos y apoyos confiables, válidos y objetivos, que permiten al investigador profundizar en un fenómeno o área del conocimiento (Baena Paz, 2017; Hernández Sampieri, 2014). Por lo tanto, para el desarrollo de la presente investigación se utilizaron:

6.5.1. Revisión de documentos

Una **revisión de documentos** es una técnica de investigación que tiene como objetivo indagar información que ya ha sido publicada en áreas relacionadas al tema de investigación (Baena Paz, 2017). Para el presente proyecto se buscó acerca de la degradación del suelo, como el establecimiento de una planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición afecta la cantidad de carbono orgánico del suelo y demás propiedades físicas y químicas del suelo, técnicas de recarbonización y recuperación existentes a nivel nacional e internacional; en bases de datos como **ScienceDirect**, **Scopus**, **Engineering Village**, documentos oficiales de entidades nacionales como la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Minas y Energías, e internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO).

6.5.2. Observación

“De acuerdo con Sampieri (2014) observar es diferente de ver, debido a que la **observación investigativa** no se limita solo al sentido de la vista, sino a todos los sentidos, es decir estar atento a los detalles, sucesos, eventos e interacciones”. Para realizar una mejor observación, se hizo uso de registro fotográfico para no perder ningún detalle y poder revisar las veces que sean necesarias las características propias del terreno como la vegetación, grado de pendiente, uso actual del suelo, actividades económicas desarrolladas alrededor del área de estudio, cercanía a la comunidad, entre otros (Hernández Sampieri, 2014).

6.5.3. Comunicación personal

Esta técnica se utilizó en la presente investigación principalmente en las conversaciones entabladas con el propietario y trabajadores de la planta de tratamiento de residuos de construcción y

demolición con el objetivo de indagar sobre el área de estudio, historial uso del suelo, cuánto tiempo lleva funcionando la planta de tratamiento, y demás datos relevantes para el desarrollo de la investigación. Así mismo, se implementó con la empresa Alimentos SAS S.A.S. para obtener la muestra de biosólidos provenientes de la planta de tratamiento de agua residual (PTAR) presente en la organización.

6.5.4. Sistemas de Información Geográfica

En el marco de esa investigación los SIG fueron herramientas utilizadas principalmente para identificar la vocación y conflicto de uso del suelo presente en el área de estudio. Se hizo uso de Google Earth para ubicar la zona de estudio de manera espacial y QGIS para la elaboración de los correspondientes mapas cuya información contenida en capas provino del Geoportal del IGAC sección datos abiertos agrología, revisadas en el año 2023.

6.5.5. Muestreo de Suelos

La **recolección de muestras de suelo** se realizó en dos momentos, el primero con el objetivo de diagnosticar las condiciones iniciales del suelo a través de una caracterización física y química y el segundo para identificar los cambios generados en aproximadamente cuatro meses por la implementación de biosólidos. Cabe destacar que ambos muestreos se realizaron siguiendo los parámetros instaurados por la Guía de Recomendaciones para la toma de muestras para análisis del laboratorio nacional de suelos del IGAC (Instituto Geografico Agustin Codazzi - IGAC, 2011).

6.6. Técnicas e instrumentos implementados en la presentación y análisis de resultados

Para la presentación y análisis de resultados se hizo uso de técnicas como la revisión de documentos para indagar sobre los métodos estadísticos que han sido utilizados en proyectos similares y que presentan de mejor manera una significancia estadística en el estudio (Baena Paz, 2017). Además, se utilizó el software AutoCad para el diseño y generación de planos del sistema de tratamientos por construir y del programa Microsoft Excel a fin de representar e identificar de mejor manera los datos estadísticos que se obtuvieron a lo largo del proyecto.

Finalmente, se realizó un análisis comparativo entre los indicadores del suelo obtenidos a inicio y final, haciendo uso de información proveniente de entidades como el IGAC y de autores que han llevado a cabo estudios similares como Soriano-Disla et al., (2010) que han sido mencionados en el capítulo 13 “*Sewage sludge additions*” del Manual Técnico de prácticas de gestión recomendadas para la recarbonización de los suelos a nivel global de la FAO (FAO, 2021) .

De acuerdo con las técnicas e instrumentos mencionados, en la Tabla 2 se puede observar de manera detallada cada una de las técnicas e instrumentos que serán implementadas en cada una de las actividades a desarrollar y los indicadores de medición para cumplir los objetivos específicos planteados en el presente proyecto.

Tabla 2. Matriz de actividades, indicadores, técnicas e instrumentos

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén- Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

Objetivo General	Objetivo Específicos	Actividades	Indicadores	Técnicas	Instrumentos
<p>Evaluar la eficiencia del tratamiento de biosólidos en condiciones ex situ sobre suelos en la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición- RCD (Usaquén- Bogotá D.C.) como estrategia de recarbonización y recuperación.</p>	<p>Diagnosticar las condiciones iniciales del suelo y de los biosólidos a través de la caracterización física y química</p>	Visita zona de estudio	Uso del suelo, tránsito maquinaria pesada, zona de relleno y acopio de RCD	Observación no estructurada	Registro anecdótico
		Conversación con propietario y trabajadores sobre historial uso del suelo	Conocimiento sobre el área de estudio, uso del suelo y tiempo de funcionamiento	Comunicación personal	Libreta de campo
		Selección área de muestreo	Historial uso del suelo	Observación no estructurada	Discusión en grupo
		Registro fotográfico	Uso del suelo y planta de tratamiento de RCD	Observación no estructurada	Cámara
		Comprobación y revisión bibliográfica del área de estudio específica a muestrear y su impacto sobre los recursos naturales	Historial uso del suelo	Revisión de documentos	Información extraída de documentos
				SIG	Información extraída de mapas
		Actividades susceptibles a producir el impacto	Matriz de aspectos e impactos ambientales y Matriz de Vicente Conesa	Información extraída de documentos	
				Discusión en grupo	
Selección y extracción muestra de suelo (zona de muestreo)	Grado de pendiente Manejo previo Tiempo de funcionamiento Presencia de rocas	Observación Zigzag	Barreno, balde o lona, bolsas plásticas, gramera		
Desarrollo de pruebas químicas en campo	Alófanos	pH _{NaF}	NaF Papel filtro		

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén- Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

Diagnosticar las condiciones iniciales del suelo y de los biosólidos a través de la caracterización física y química	Enviar muestra de suelo a laboratorios del IGAC para el análisis de las propiedades fisicoquímicas seleccionadas	Temperatura Edáfica	Termómetro Edáfico	Termómetro Edáfico
		Carbonato de Calcio	Adición de HCl	HCl
		Textura	Bouyoucos	Resultados de laboratorio de las muestras de suelo antes de la implementación de biosólidos
		Capacidad de intercambio catiónico (cmol/kg)	Extracción con acetato de Amonio 1M, pH 7.0 y cuantificación por titulación volumétrica	
		Fósforo disponible	Extracción con solución Bray II- Cuantificación espectrofotométrica en el rango visible	
		Carbono orgánico (%)	Walkley-Black y cuantificación por volumetría	
		Nitrógeno Total	Kjeldahl y titulación potenciométrica	
		pH	Potenciómetro en relación suelo/agua 1:1	
		Relación C/N	Ecuación	
		Materia orgánica	Calcinación a 550°C y cuantificación gravimétrica	
Diagnosticar las condiciones iniciales del suelo y de los biosólidos a través de la caracterización física y química	Desarrollo prueba de estabilidad de agregados, conductividad eléctrica, densidad real y densidad aparente en el laboratorio de la Universidad El Bosque	Estabilidad de agregados	Yoder	Tamizador Yoder
		Conductividad eléctrica	Potenciométrico	Potenciómetro
		Densidad real	Método del picnómetro	Picnómetro-Campana de vacío
		Densidad aparente	Método del cilindro	Cilindro metálico
		Humedad de campo	Método gravimétrico	Horno de secado
		Porosidad	Cálculo de la porosidad	Ecuación

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén- Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

		Procesamiento resultados obtenidos	Propiedades físicas y químicas analizadas	Registro de datos obtenidos	Tablas de organización
	Diagnosticar las condiciones iniciales del suelo y de los biosólidos a través de la caracterización física y química	Contacto con la empresa Alimentos SAS S.A.S. para la obtención de los biosólidos	Conocimiento sobre el origen de los biosólidos y composición	Comunicación personal	Libreta de campo
		Enviar muestra de biosólidos a los laboratorios de Agrilab para el análisis de las propiedades químicas seleccionadas	pH	Potenciómetro	Resultados de laboratorio de las muestras de biosólidos
			Nitrógeno Total	Sumatoria de especies de nitrógeno requeridas	
			Nitrógeno Orgánico	Micro-Kjeldahl. Volumetría	
			Conductividad eléctrica	Pasta de saturación. Conductimétero	
			Capacidad de Intercambio Catiónico	Acetato de Amonio. Volumétrico	
			Carbono orgánico	Sln. K ₂ Cr ₂ O. Colorimétrico	
		Relación carbono/nitrógeno	Relación matemática		
	Diseñar un prototipo ex situ para monitorear el proceso de recarbonización y recuperación de suelos bajo condiciones controladas	Revisión bibliográfica	Selección de tratamientos	Revisión de documentos	Información extraída de documentos
		Identificación del número de tratamientos y réplicas a realizar	Significancia estadística	Revisión de documentos	Información extraída de documentos
		Selección de las dosis proporción/ relación suelo: biosólidos a aplicar en cada tratamiento	Proporción suelo: biosólidos	Revisión de documentos	Información extraída de documentos

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén- Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

Diseñar un prototipo ex situ para monitorear el proceso de recarbonización y recuperación de suelos bajo condiciones controladas	Diseño, construcción y establecimiento del prototipo de recuperación de los tratamientos de suelos (Instalaciones Universidad El Bosque- Sede Chía)	Dimensiones del sistema de tratamientos: Diámetro interno (tubo pvc) Longitud tubo pvc Largo-ancho-alto caja de madera Control de riego	AutoCad Revisión de documentos	Información extraída de documentos Tubos de pvc, madera de pino Planos
	Monitoreo y seguimiento de los tratamientos establecidos durante aproximadamente 4 meses	Control de riego Verificación de temperatura ambiente pH, conductividad eléctrica, temperatura edáfica	Observación del estado de los tratamientos Registro fotográfico	Libreta de campo Cámara
Comparar la eficiencia de las dosis del tratamiento de biosólidos sobre los procesos de recarbonización y	Enviar los tratamientos a los laboratorios del	Textura	Bouyoucos	
		Capacidad de intercambio catiónico (cmol/kg)	Extracción con acetato de Amonio 1M, pH 7.0 y cuantificación por titulación volumétrica	
		Fósforo disponible	Extracción con solución Bray II- Cuantificación espectrofotométrica en el rango visible	

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén- Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

recuperación de algunos indicadores de calidad del suelo como alternativa sostenible	IGAC para el análisis de las propiedades fisicoquímicas evaluadas	Carbono orgánico (%)	Walkley-Black y cuantificación por volumetría	Resultados de laboratorio de las muestras de suelo posterior de la implementación de biosólidos
		Nitrógeno Total	Kjeldahl y titulación potenciométrica	
		pH	Potenciómetro en relación suelo/agua 1:1	
		Materia orgánica	Calcinación a 550°C y cuantificación gravimétrica	
		Relación C/N	Ecuación	
Comparar la eficiencia de las dosis del tratamiento de biosólidos sobre los procesos de recarbonización y recuperación de algunos indicadores de calidad del suelo como alternativa sostenible	Desarrollo prueba de estabilidad de agregados, conductividad eléctrica, densidad real, densidad aparente y porosidad en el laboratorio de la Universidad El Bosque	Estabilidad de agregados	Yoder	Tamizador Yoder
		Conductividad eléctrica	Potenciométrico	Potenciómetro
		Densidad real	Método del picnómetro	Picnómetro-Campana de vacío
		Densidad aparente	Método del cilindro	Cilindro metálico
		Humedad de campo	Método gravimétrico	Horno de secado
		Porosidad	Cálculo de la porosidad	Ecuación
	Revisión bibliográfica	Método estadístico	Revisión de documentos	Información extraída de documentos
Selección del método estadístico	Proyección (extrapolable) Regresiones	Coficiente de Pearson Prueba T-Student	Información extraída de documentos	

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén- Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

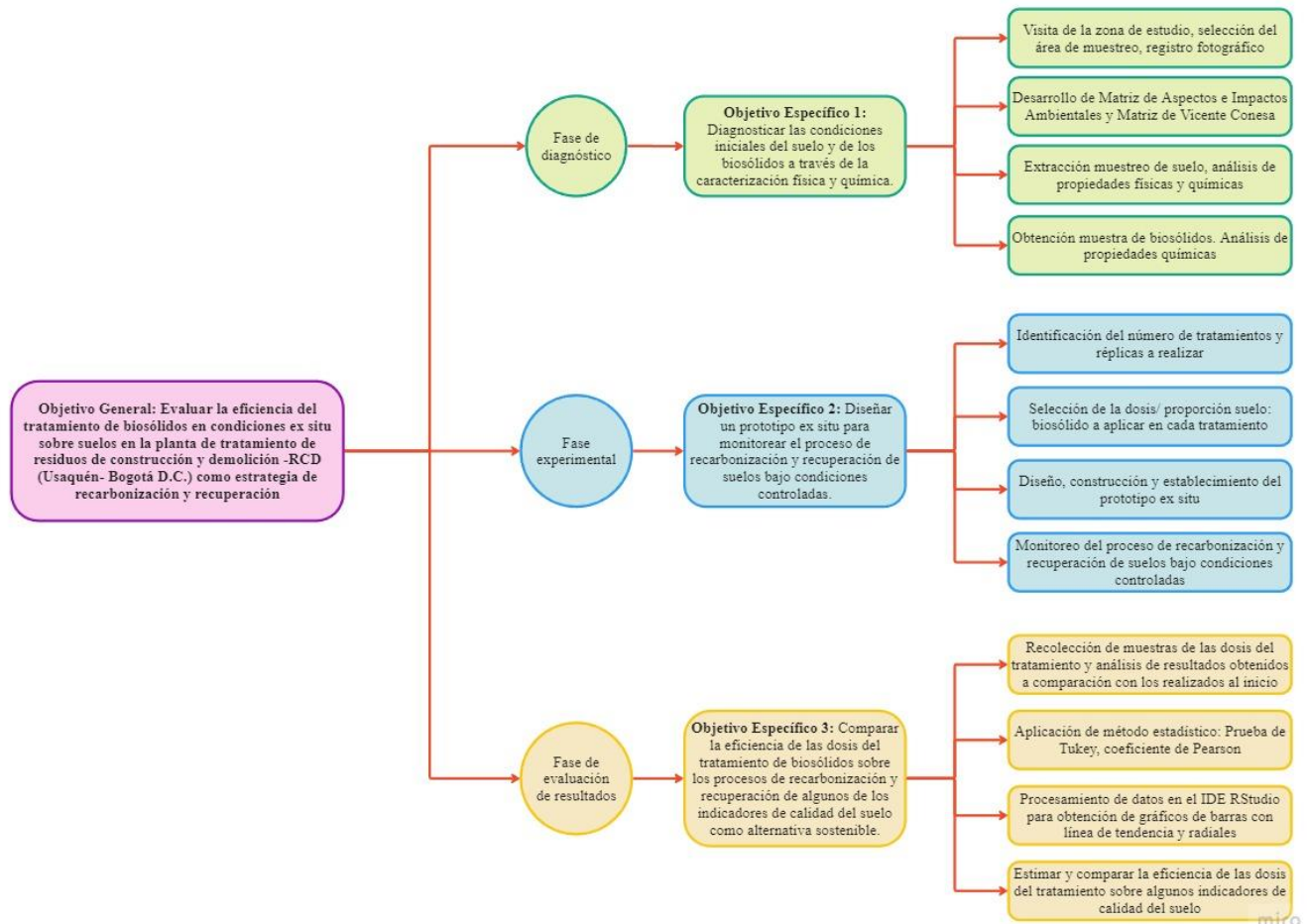
		Procesamiento de resultados	Propiedades fisicoquímicas analizadas	Gráfico de barras con línea de tendencia y radiales	Microsoft Excel
		Estimar la eficiencia de las dosis del tratamiento de biosólidos sobre los indicadores de calidad del suelo	Eficiencia del tratamiento	Revisión de documentos	Información extraída de documentos

Fuente: Autora, 2023

6.7. Plan de Trabajo

El plan de trabajo se realizó teniendo en cuenta las fases de investigación que abarcan cada uno de los objetivos específicos planteados en el presente proyecto, la Figura 8 presenta de manera detallada el procedimiento realizado.

Figura 8. Plan de Trabajo

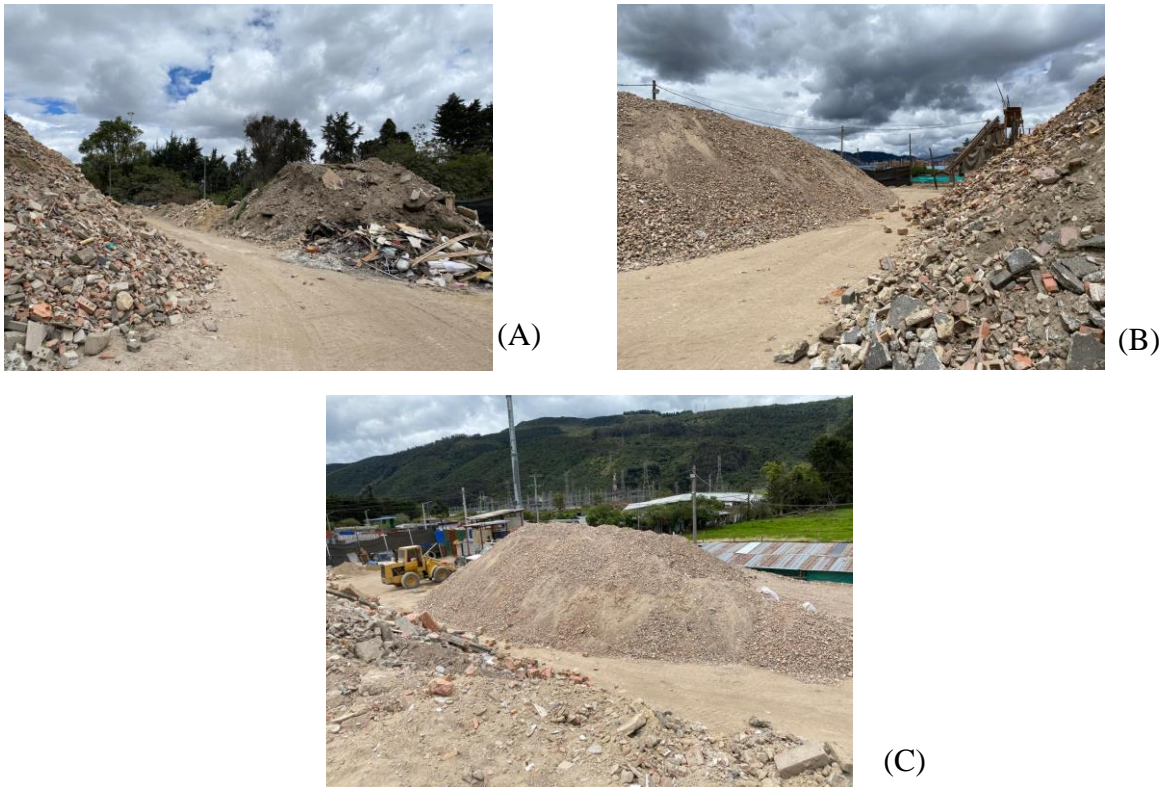


Fuente: Autora, 2023

Metodología del objetivo específico No.1. Diagnosticar las condiciones iniciales del suelo y de los biosólidos a través de la caracterización física y química

Para realizar el diagnóstico de las condiciones iniciales del suelo fue necesario visitar la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición- RCD (Figura 9 A, B y C), con el objetivo de conversar con los trabajadores y el propietario para así a través de la técnica de comunicación personal obtener información sobre el historial de uso del suelo, el tipo de actividad que se ha realizado en la zona y por cuanto tiempo se ha estado presentando. De acuerdo con los trabajadores del lugar (comunicación personal, 16 de mayo de 2023) la planta de tratamiento de RCD funciona desde hace un año aproximadamente y antes el terreno estaba lleno de hierba, simulando las condiciones de un “potrero”. Por otro lado, según el testimonio del propietario la actividad de acopio y transformación de este tipo de residuo se continuará realizando hasta nuevo aviso (comunicación personal, 16 de mayo de 2023).

Figura 9. Planta de Tratamiento de Residuos de Construcción y Demolición- RCD: diferentes sectores de la zona de estudio (A, B y C)



Fuente: Tomadas por Autora, 2023

Para validar que realmente en la zona elegida se presenta la planta de tratamiento de RCD y genera impactos ambientales se hizo uso de herramientas SIG como Google Earth y QGis para la generación de un mapa de conflicto de uso del suelo (Figura 7), el cual permitió deducir con ayuda de revisión documental el estado actual del recurso suelo; además se hizo uso de matrices como la de identificación de aspectos e impactos ambientales y la de importancia del impacto ambiental más conocida como la matriz de Vicente Conesa simplificada (Jiménez Vélez, 2020).

La matriz de identificación de aspectos e impactos ambientales es una herramienta de doble entrada que permite identificar los elementos de una actividad en este caso de la Planta de Tratamiento de RCD, relacionadas a la interacción con el ambiente, permitiendo valorar el daño producto de esta actividad (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2017). Para el desarrollo de esta matriz se deben tener en cuenta los pasos descritos por (Duarte Velasco, 2000):

- Describir el ambiente como un conjunto de *factores medioambientales* (Duarte Velasco, 2000).
- Describir la actividad que se evalúa como un conjunto de *acciones* (Duarte Velasco, 2000).
- Identificar los *impactos* que cada *acción* tiene sobre cada *factor medioambiental* (Duarte Velasco, 2000).
- Caracterizar cada *impacto* mediante la estimación de su *importancia* (Duarte Velasco, 2000).
- Analizar la *importancia* global de la actividad sobre el medio, utilizando para ello las *importancias* individuales de cada *impacto* (Duarte Velasco, 2000).

Ahora bien, de acuerdo con Arboleda González, (2008) para lograr el desarrollo de la matriz e implementarla como un criterio de selección, se requiere realizar un análisis de la información técnica del proyecto con “ojos ambientales”, es decir, identificar minuciosamente aquellas acciones (actividades, operaciones, procedimiento, elementos, aspectos, tareas, etc) del proyecto, que están relacionándose con el ambiente, porque éstas son las que generarán, de manera directa o indirecta, los cambios en varios de los componentes del ecosistemas. Estas acciones se denominan: **Acciones susceptibles de producir impacto (ASPI)** (Arboleda González, 2008).

Por ejemplo, las excavaciones, el descapote, mantenimiento de maquinaria, entre otras, son ASPI porque están interactuando con el ambiente y están en la capacidad de provocar perturbaciones en algunos de sus componentes (Arboleda González, 2008). Por ende, surge la necesidad de caracterizar el ambiente, enfocándose en aquellos atributos que puedan resultar principalmente afectados por las distintas acciones del proyecto (ASPI) en cada una de sus fases; estos aspectos ambientales se denominan **Factores ambientales representativos del impacto (FARI)** (Arboleda González, 2008).

Una vez determinados los FARI y los ASPI se procede a identificar los *Impactos* que estas últimas tienen sobre los primeros, con el objetivo de generar una matriz en donde las filas corresponden a las *acciones*, las columnas corresponden a los *factores* y en la intersección se consigna la *importancia del impacto* que la acción tiene sobre el factor aplicando la ecuación 1 de la matriz de Vicente Conesa, la cual utiliza una serie de criterios que se presentan en la Tabla 3 (Arboleda González, 2008).

Tabla 3. Criterios de la metodología de Conesa

Criterios		Significado
Signo	+/-	Hace alusión al carácter benéfico (+) o perjudicial (-) de las distintas acciones que van a actuar sobre los factores ambientales considerados
Intensidad	IN	Grado de incidencia de la acción sobre el factor en el ámbito específico en el que actúa
Extensión	EX	Área de influencia teórica del impacto en relación con el entorno de la actividad
Momento	MO	Alude al tiempo entre la aparición de la acción que produce el impacto y el comienzo de las alteraciones sobre el factor considerado
Persistencia	PE	Tiempo que supuestamente permanecerá el efecto desde su aparición y a partir del cual el factor afectado retornaría a las condiciones iniciales previas a la acción por los medios naturales o mediante la introducción de medidas correctoras
Reversibilidad	RV	Se refiere a la posibilidad de reconstrucción del factor afectado, es decir, la posibilidad de retornar a las condiciones iniciales previas a la acción, por medios naturales, una vez aquella deje de actuar sobre el medio.
Recuperabilidad	MC	Se refiere a la posibilidad de reconstrucción, total o parcial del factor afectado, es decir la posibilidad de retornar a las condiciones iniciales previas a la acción, por medio de la intervención humana.
Sinergia	SI	Contempla el reforzamiento de dos o más efectos simples. La componente total de la manifestación de los efectos simple, provocados por acciones que actúan simultáneamente, es superior a la que cabría esperar cuando las acciones que las provocan actúan de manera independiente, no simultánea.

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

Acumulación	AC	Idea del incremento progresivo de la manifestación del efecto cuando persiste de forma continuada o reiterada la acción que lo genera.
Efecto	EF	Se refiere a la relación causa-efecto, es decir, a la forma de manifestación del efecto sobre un factor, como consecuencia de una acción.
Periodicidad	PR	Se refiere a la regularidad de manifestación del efecto, bien sea de manera cíclica o recurrente (efecto periódico), de forma impredecible en el tiempo (efecto irregular) o constante en el tiempo (efecto continuo)

Fuente: (Conesa, 1997)

Cada uno de los criterios descritos se evalúan y califican de acuerdo con los rangos que se establecen en la Tabla 4 con el objetivo de obtener la importancia (I) de las consecuencias ambientales del impacto, aplicando la siguiente ecuación (Arboleda González, 2008).

$$I = (3IN + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC)$$

Ecuación 1. Logaritmo para cálculo de la importancia (Conesa, 1997)

Tabla 4. Rangos para el cálculo de la importancia ambiental

Criterio/Rango	Calificación	Criterio/Rango	Calificación
Naturaleza		Intensidad (IN)	
Impacto benéfico	+	Baja	1
Impacto perjudicial	-	Media	2
		Alta	4
		Muy alta	8
		Total	12
Extensión (EX)		Momento (MO)	
Puntual	1	Largo plazo	1
Parcial	2	Medio plazo	2
Extensa	4	Inmediato	4
Total	8	Crítico	(4)
Crítica	(4)		
Persistencia (PE)		Reversibilidad (RV)	
Fugaz	1	Corto plazo	1
Temporal	2	Medio plazo	2
Permanente	4	Irreversible	4
Sinergia (SI)		Acumulación (AC)	
Sin sinergismo	1	Simple	1
Sinérgico	2	Acumulativo	4
Muy sinérgico	4		
Efecto (EF)		Periodicidad (PR)	
Indirecto	1	Irregular o aperiódico o discontinuo	1
Directo	4	Periódico	2
		Continuo	4
Recuperabilidad (MC)			
Recuperable inmediato	1		
Recuperable a medio	2		

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

plazo Mitigable o compensable	4		
Irrecuperable	8		

Fuente: (Conesa, 1997)

Una vez se le asignen los valores a cada criterio, la importancia del impacto puede variar entre 13 y 100 unidades que de acuerdo con el reglamento EIA español, establece la siguiente significancia (Arboleda González, 2008):

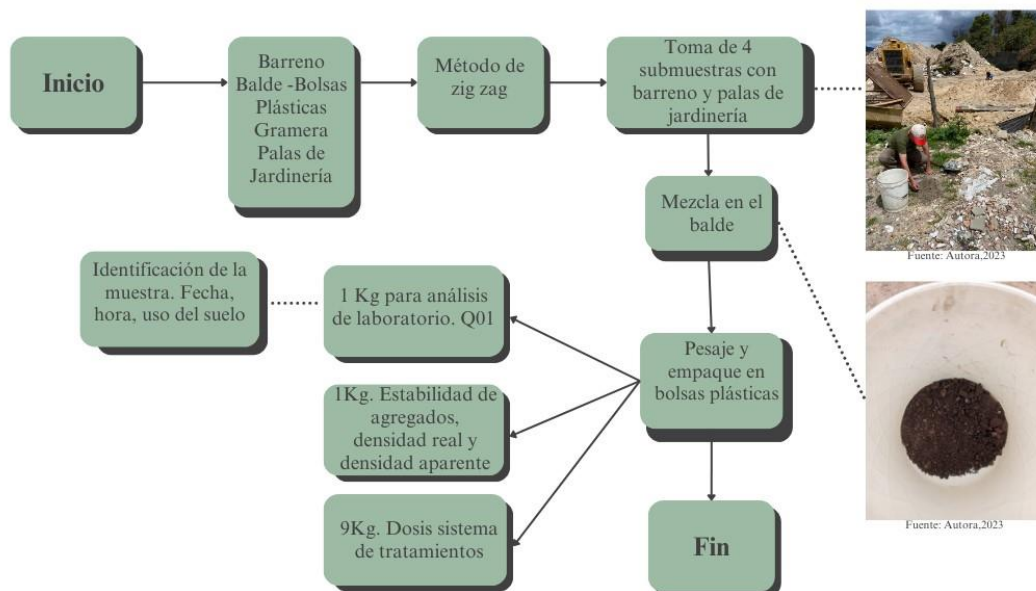
Tabla 5. Ponderación del impacto

Rango de importancia	Clase de efecto	Semaforización
$0 \leq 25$	Compatible	
$26 \leq 50$	Moderado	
$51 \leq 75$	Crítico	
$76 \leq 100$	Severo	

Fuente: elaboración propia. Modificado de (Conesa, 1997)

Para la selección de la zona de muestreo se tuvo en cuenta características como grado de pendiente y de erosión, tipo de vegetación, manejo previo y presencia de rocas (Instituto Geografico Agustín Codazzi - IGAC, 2011). Una vez identificada, se realizó la extracción de las muestras del suelo aplicando la metodología de zigzag impartida por el IGAC (Figura 10) (Instituto Geografico Agustín Codazzi - IGAC, 2011). De acuerdo con el IGAC, (2011) la herramienta más apropiada para el muestreo es el barreno debido que permite obtener una cantidad de muestra a una profundidad de entre 2 y 20 cm por punto bastante homogénea.

Figura 10. Extracción muestra de suelo



Fuente: Autora, 2023

Como se observa en el mapa (Figura 11), se tomaron 4 submuestras con su respectiva coordenada y cuyos datos fueron interpolados, para así predecir los valores de las demás ubicaciones sobre el terreno en función de las mediciones encontradas en el conjunto de los 4 puntos, debido a que, por

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

condiciones de tránsito de maquinaria pesada y acceso al resto del terreno no fue posible extraer mayor cantidad (ArcGIS, 2023).

Figura 11. Mapa Interpolación, zona de muestreo (recuadro amarillo)



Fuente: Autora, 2023

Posteriormente, como se describe en la Figura 10 el suelo extraído se mezcló en un balde hasta obtener una muestra compuesta homogénea de aproximadamente 1Kg, que fue empacada en una bolsa plástica con el objetivo de identificarla con datos como el uso actual del suelo y solicitud de análisis, el cual para la necesidad de este proyecto fue la prueba Q01 del laboratorio nacional de suelos- IGAC que evalúa propiedades físicas y químicas como textura, capacidad de intercambio catiónico, retención de humedad, densidad real y aparente, porosidad, fósforo disponible, carbono orgánico, materia orgánica, nitrógeno total y pH; que resultan ser indispensables para el análisis de las condiciones iniciales del suelo degradado (FAO, 2021; Instituto Geografico Agustin Codazzi - IGAC, 2011).

Adicional al kilogramo de muestra que fue analizada en los laboratorios de suelos del IGAC se extrajo 1Kg para el desarrollo de la prueba de estabilidad de agregados a través de la técnica de Yoder, densidad real aplicando el método del picnómetro, densidad aparente por medio del método del cilindro, humedad gravimétrica y conductividad eléctrica; y nueve kilogramos para el establecimiento del sistema de tratamientos a dosis de 2 kilogramos de biosólidos por kilogramo de suelo y 4 kilogramos de biosólidos por kilogramo de suelo (Gómez, 2013; IGAC, 2021).

Durante el muestreo de suelos se realizó la medición (en cada uno de los cuatro puntos seleccionados) de alófanos aplicando la prueba de pH_{NaF} que como se observa en la Figura 12 consiste en poner una pequeña cantidad de material de suelo en un papel de filtro previamente remojado en fenolftaleína y adicionando gotas de 1M NaF (FAO, 2009). Además, se determinó la



Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

temperatura edáfica del suelo haciendo uso de un termómetro edáfico (Figura 13) y se identificó la presencia de carbonato de calcio (CaCO_3) a través de la adición al suelo de gotas de HCl (ácido clorhídrico) al 10% en donde el grado de efervescencia del gas de dióxido de carbono fue indicativo de la cantidad de carbonato de calcio presente en el suelo (Figura 14) (FAO, 2009).

<i>Figura 12. Medición de alófanos</i>	<i>Figura 13. Determinación temperatura edáfica</i>	<i>Figura 14. Medición presencia de carbonato de calcio</i>
		

Fuente: Tomadas por Autora, 2023

En cuanto a la prueba de densidad aparente, desarrollada bajo el método del cilindro metálico, en campo se tomó una muestra indisturbada de suelo (Figura 15) para posteriormente en las instalaciones del laboratorio de la Universidad El Bosque transvasar el contenido a una cápsula de humedad y tomar el peso del suelo más la cápsula, la cual se introdujo en un horno de secado a una temperatura de 105°C por 24 horas para luego ser extraída y tomar el peso del suelo seco más la cápsula (Figura 16) y realizar los correspondientes cálculos (Ecuación 2) (Gómez, 2013).

<i>Figura 15. Cilindro metálico, densidad aparente</i>	<i>Figura 16. Peso suelo seco más capsula</i>
	

Fuente: Tomadas por Autora, 2023

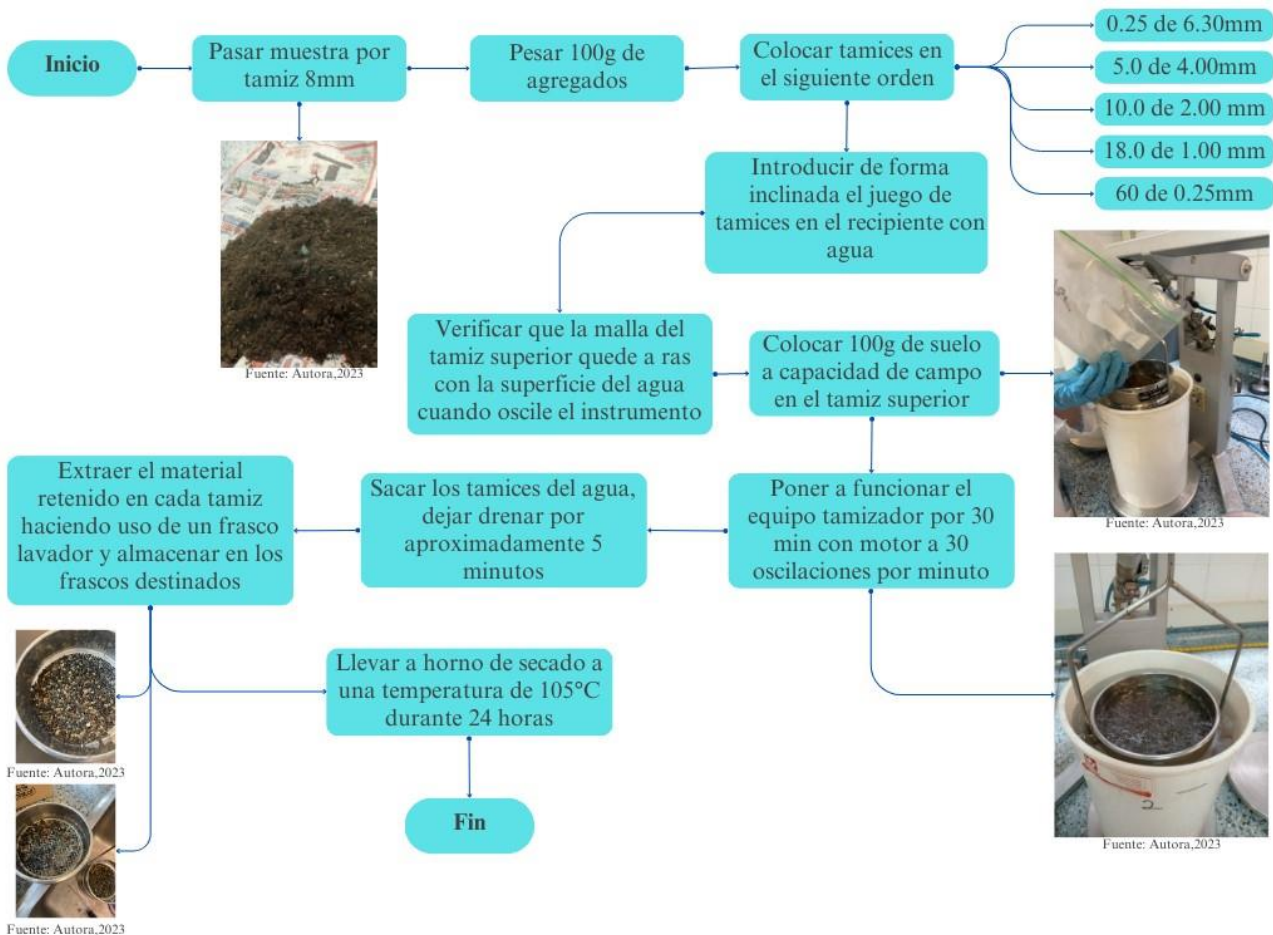
$$D_a = \frac{\text{Peso suelo seco } 105^{\circ}\text{C}}{\text{Volumen del cilindro}}$$

Ecuación 2. Cálculo densidad aparente (Gómez, 2013)

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

En las instalaciones del laboratorio de la Universidad El Bosque también se llevaron a cabo las pruebas de estabilidad de agregados a través del método de Yoder, conductividad eléctrica haciendo uso del conductímetro y densidad real aplicando el método del picnómetro (IGAC, 2021). En primer lugar, la técnica de Yoder, como se observa en la Figura 17 consiste en pasar la muestra de suelo por una serie de tamices de diferente diámetro y sumergirlas en agua con el objetivo de imitar las fuerzas naturales que actúan cuando el agua entra en los agregados del suelo (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, 2013).

Figura 17. Método de Yoder



Fuente: Autora, 2023

A partir del procedimiento descrito en la Figura 17 y luego del secado en estufa se realizaron los cálculos estipulados en el Manual de Suelos: Guía de laboratorio y campo del autor Ricardo Campos Segura donde se debe determinar la humedad gravimétrica de la muestra y el porcentaje retenido en cada tamiz, además de calcular el valor de X y Y de acuerdo con las ecuaciones 3 a la 7 con el objetivo de identificar la calificación que presenta el suelo analizado teniendo en cuenta las Tablas 6 y 7 (Campos Segura, 2017).

$$P_w = \frac{P_{sh} - P_{ss} \times 100}{P_{ss}}$$

Ecuación 3. Cálculo de humedad gravimétrica (Campos Segura, 2017)

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

Donde P_{ss} es el peso de la muestra seca al horno y P_{sh} indica el peso del suelo húmedo retenido en cada tamiz (Campos Segura, 2017).

$$P_{ss} = \frac{P_{sh} \times 100}{P_w + 100}$$

Ecuación 4. Cálculo peso de la muestra seca al horno (Campos Segura, 2017)

Donde P_w es la humedad gravimétrica. Se obtiene al tomar 10g de suelo inicial, ponerlos en estufa por 24 horas a 105°C y luego volver a pesar (Campos Segura, 2017).

$$\% \text{Retenido} = \frac{\text{Peso retenido}}{P_{ss}} \times 100$$

Ecuación 5. Cálculo porcentaje retenido (Campos Segura, 2017)

$$X = \sum \frac{\text{Diámetro medio} \times \% \text{retenido}}{100}$$

Ecuación 6. Cálculo valor de X (Campos Segura, 2017)

El diámetro medio es el tamaño promedio entre los tamices inferior y superior en cada fracción (Campos Segura, 2017).

$$Y = (0,876)(X) - (0,079)$$

Ecuación 7. Diámetro promedio de agregados (Campos Segura, 2017)

El valor de Y es el diámetro promedio de los agregados, hallado estadísticamente. No existe un valor único para separar suelos bien o mal estructurados, pero un valor menor que 0,5 es índice de mala agregación (Campos Segura, 2017).

Tabla 6. Calificación diámetro ponderado medio

DPM (mm)	Estabilidad estructural
<0.5	Inestable
0.5-1.5	Ligeramente estable
1.5-3.0	Moderadamente estable
3.0-5.0	Estable
>5.0	Muy estable

Fuente: (IGAC, 2006)

Tabla 7. Calificación del estado de agregación

Porcentaje de agregados > 0.5mm	Estado de agregación (ea)	Clase
>90	Muy alta	1
90-80	Alta	2
80-35	Media	3

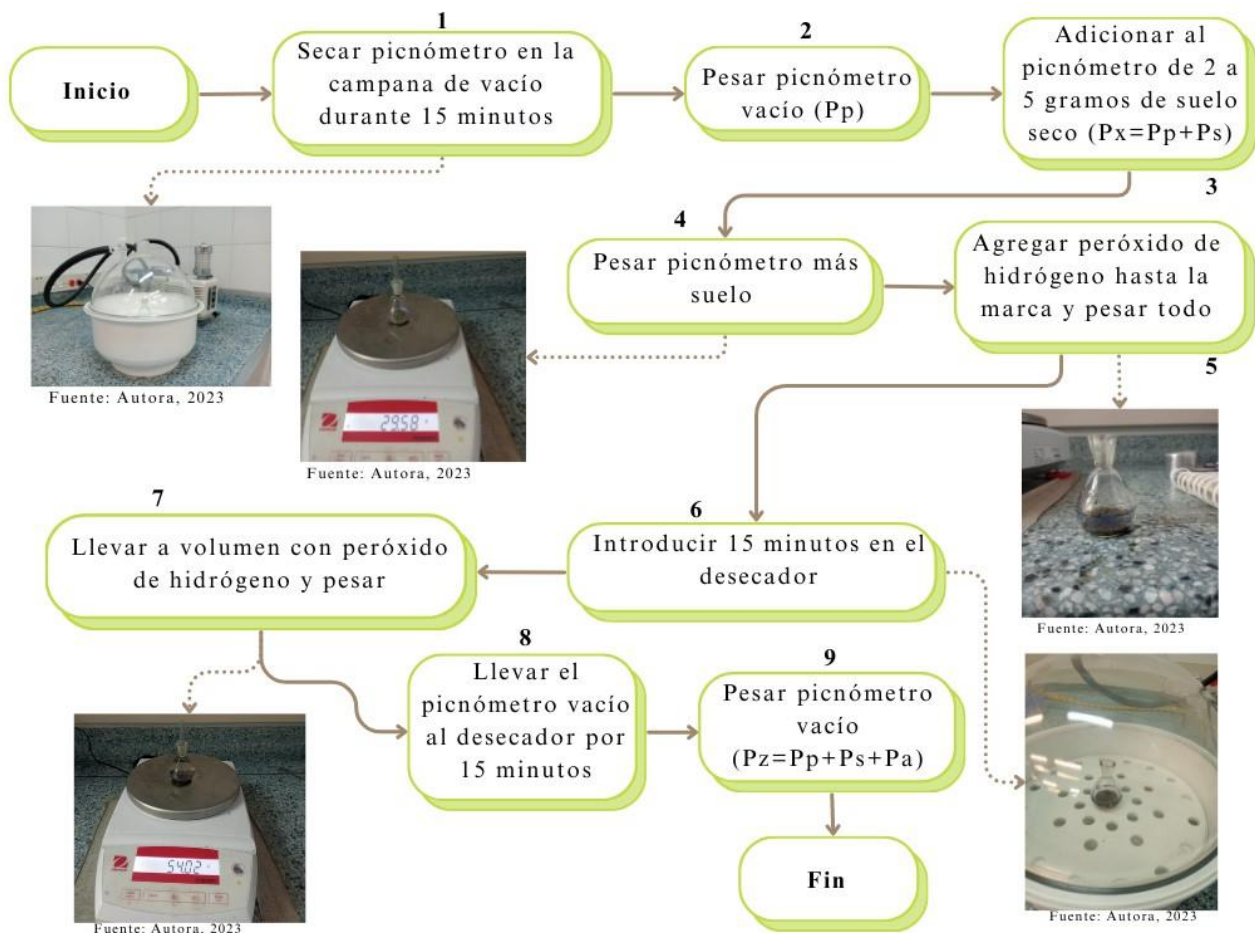
Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

35-25	Baja	4
<25	Muy baja	5

Fuente: (IGAC, 2006)

La prueba de densidad real se desarrolló bajo el método del picnómetro descrito en la Figura 18, cabe destacar que en el paso número tres se hace uso del suelo seco con el objetivo de eliminar el error que se cometería en relación con el peso del suelo tomado como base; así mismo, en este procedimiento como se conoce el peso del picnómetro (**Pp**) se logró calcular el peso del suelo a través de la ecuación 8 (Campos Segura, 2017).

Figura 18. Determinación de la densidad real del suelo, método del picnómetro



Fuente: Autora, 2023

$$P_s = P_x - P_p$$

Ecuación 8. Cálculo peso del suelo (Campos Segura, 2017)

Posteriormente, en la sección número siete del método al llevar a volumen con agua el picnómetro y colocar el tapón permitiendo la salida del agua en exceso, se debió evitar al máximo la presencia de burbujas de aire atrapado en el suelo mediante pequeños golpes, dicho esto, el agua que salió del tapón era agua que excedía el volumen del picnómetro y según lo establecido por Campos Segura, (2017) se le debía atribuir el nombre de **Vp**. Luego, en el paso nueve se debió secar completamente el picnómetro y pesarlo nuevamente con el objetivo de obtener el valor del peso del agua (**Pa**) expresado en la ecuación 9.

$$Pa = Pz - (Ps + Pp)$$

Ecuación 9. Determinación peso del agua (Campos Segura, 2017)

Donde:

Pa: Peso del agua

Pz: Peso picnómetro vacío y seco

Ps: Peso suelo

Pp: Peso inicial picnómetro

Finalmente, para el cálculo de la densidad real del suelo se tuvo en cuenta la siguiente ecuación (Campos Segura, 2017).

$$Dr = \frac{Ps}{Vs}$$

Ecuación 10. Cálculo densidad real (Campos Segura, 2017)

No obstante, se debe tener en cuenta que el peso del agua es equivalente al volumen de agua debido a que la densidad del agua destilada es igual a 1, por lo tanto, la variable que concierne despejar de la ecuación 9 es el peso del suelo (**Ps**) con el objetivo de reemplazar este valor en la ecuación 10 (Campos Segura, 2017). En cuanto al volumen de sólidos (**Vs**) se determina a partir de la ecuación 11 (Campos Segura, 2017).

$$Vs = Vp - Va$$

Ecuación 11. Cálculo volumen sólidos (Campos Segura, 2017)

Donde Vp es el agua en exceso que sale por el tapón en el paso número 9 y Va equivale al volumen de agua (Campos Segura, 2017).

Respecto a la determinación de la porosidad, se tuvo en cuenta la ecuación presentada por Gómez, (2013) en donde se tiene en cuenta los valores de densidad real y aparente que fueron calculados en los anteriores procedimientos.

$$P = \left\{ 1 - \frac{Da}{Dr} \right\} \times 100$$

Ecuación 12. Cálculo porosidad (Gómez, 2013)

Por último, las tablas 8, 9, 10 y 11 se tuvieron en cuenta para el procesamiento de resultados, siendo la base para la interpretación de los valores obtenidos en cada uno de los parámetros químicos analizados.

Tabla 8. Nivel de pH

Nivel	pH
Extremadamente ácido	<4.5
Muy fuertemente ácido	4.6-5.0
Fuertemente ácido	5.1-5.5
Medianamente ácido	5.6-6.0
Ligeramente ácido	6.1-6.5
Neutro	6.6-7.3
Ligeramente alcalino	7.4-7.8
Medianamente alcalino	7.9-8.4

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

Fuertemente alcalino	8.5-9.0
Extremadamente alcalino	>9.0

Fuente: (IGAC, 2021)

Teniendo en cuenta que el clima de la zona de estudio es frío el IGAC, (2021) establece que el rango de valores a tener en cuenta para los parámetros de nitrógeno total, porcentaje de materia y carbono orgánico, capacidad de intercambio catiónico y saturación de bases deben ser seleccionados bajo este criterio.

Tabla 9. Fósforo disponible y nitrógeno total

Apreciación	Fósforo Disponible (ppm)	Nitrógeno Total (%)
Bajo	<15	<0.25
Medio	15-40	0.26-0.5
Alto	>40	>0.5

Fuente: (IGAC, 2021)

Tabla 10. Porcentaje de materia y carbono orgánico, clima frío

Apreciación	M.O (%)	C.O (%)
Bajo	<5	<2.9
Medio	5-10	2.9-8.1
Alto	>10	>8.1

Fuente: (IGAC, 2021)

Tabla 11. Capacidad de Intercambio Catiónico y Saturación de Bases

Apreciación	CIC (meq/100g)	SB (%)
Bajo	<10	<35
Medio	10-20	35-50
Alto	>20	>50

Fuente: (IGAC, 2021)

Posteriormente, a través de la técnica de comunicación personal se conversó con la jefe de calidad de la empresa Alimentos SAS con el objetivo de obtener la muestra de lodo seco que de acuerdo con el Decreto 1287 de 2014, *Artículo 3° Definiciones*, es el producto resultante en el tratamiento de aguas residuales el cual debe estabilizarse para recibir el nombre de biosólidos (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2014). Además, si no se estabiliza el lodo puede generar riesgos potenciales para la salud pública y el ambiente, debido a la concentración de metales pesados, microorganismos patógenos y vectores que transmiten enfermedades, por lo tanto, la empresa Alimentos SAS como método de estabilización utiliza la deshidratación por centrifugación que consiste en aplicar la fuerza centrífuga al lodo para separar la fracción sólida de la líquida por diferencia de densidades (Castellanos-Rozo et al., 2018).

La extracción de la muestra de biosólido se realizó aplicando la metodología establecida por la cde debido a que el correcto muestreo es crucial para la representatividad de los resultados del análisis del biosólido; para el desarrollo de esta investigación se extrajo una muestra compuesta la cual resulta de la mezcla y homogeneización de varias muestras puntuales tomadas al azar, en este caso de biosólidos proveniente del tratamiento de aguas residuales (Figura 19). Cabe destacar que este biosólido estuvo acumulado por una semana en los diferentes tanques de decantación destinados.

Figura 19. Biosólido; acumulación en tanques de decantación (A), envase para almacenamiento de la muestra (B)



(A)

(B)

Fuente: Tomadas por Autora, 2023

Por otro lado, el almacenamiento y transporte de la muestra de 18Kg se realizó a través de envases de boca ancha de polietileno debido a que no es un material que reacciona con la muestra (FAO, 2018). Como se observa en la secuencia de la Figura 19 los envases estuvieron libres de fisuras, fueron resistentes a las fuerzas mecánicas típicas durante el traslado y sus tapas aseguraron el sello de la muestra contra el aire (FAO, 2018). En cuanto a su conservación, las muestras se guardaron en los domos pertenecientes al programa de Bioingeniería en las instalaciones de la Universidad El Bosque Sede Chía, en donde estuvieron en ambientes oscuros con temperaturas inferiores, previniendo así procesos de digestión que pueden alterar la calidad de la muestra (FAO, 2018).

Adicionalmente, se extrajo 1Kg para realizarle el análisis PQ501 en los laboratorios de Agrilab, debido a que esta prueba evalúa propiedades químicas como el carbono orgánico, nitrógeno total y nitrógeno orgánico, pH, conductividad eléctrica, relación carbono- nitrógeno y capacidad de intercambio catiónico, las cuales según González-Ubierna et al., (2013) ,Pitombo et al., (2015), Soriano-Disla et al., (2010), Potisek Talavera et al., (2010), entre otros autores, son las principales propiedades químicas de los biosólidos a tener en cuenta para aplicarlos sobre el suelo y no generar perjuicio alguno sino por el contrario mejorar los indicadores de calidad del suelo.

Metodología del objetivo específico No.2. Diseñar un prototipo ex situ para monitorear el proceso de recarbonización y recuperación de suelos bajo condiciones controladas.

Para el diseño del prototipo de recarbonización y recuperación de los tratamientos de suelos bajo condiciones controladas se realizó una revisión documental de artículos señalados en el capítulo 13 “*Sewage Sludge additions*” del Manual técnico de prácticas de gestión del suelo recomendadas para la recarbonización del suelo de la FAO, (2021) con el propósito de recolectar información de estudios similares e identificar el tipo de metodología realizada, la dosis suelo: biosólido instaurada y los mejores resultados obtenidos a corto plazo como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Características generales de investigaciones sobre adición de biosólidos como enmienda orgánica

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén- Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

Autor y Año	Nombre artículo	Metodología	Proporción suelo: biosólido	Tiempo	Resultados
(Soriano-Disla et al., 2010)	<i>Contribution of a sewage sludge application to the short-term carbon sequestration across a wide range of agricultural soils</i>	<ul style="list-style-type: none"> -Ex situ -Extracción de 60 muestras de suelo tomadas a una profundidad de 0-30cm -Aireación, homogeneización y tamizaje a < 2mm - “Column Study”- Mezcla establecida en columnas de PVC (30cm de longitud, 12 cm de diámetro interno) -Mantenimiento (60%) de capacidad de almacenamiento de agua -Temperatura ambiente -Aplicación de irrigación después de los 2,4 y 6 meses 	Dosis única de 50t en peso seco/ha	6 meses	<ul style="list-style-type: none"> -En suelos con valores de carbono orgánico (COS) mayores a 15 g COS Kg⁻¹ decreció los niveles de COS -Incremento de 1,7± 1,6g de COS por kilogramo de suelo, con incremento de 3,8g de COS - pH presenta correlación con COS- coeficiente de Pearson: 0,328 - Conductividad eléctrica presenta correlación con COS- coeficiente de Pearson: 0,185 - Nitrógeno total presenta correlación con COS- Coeficiente de Pearson: 0,911
(Börjesson & Kätterer, 2018)	<i>Soil fertility effects of repeated application of sewage sludge in two 30-year-old field experiments</i>	<ul style="list-style-type: none"> -Ensayos instaurados en un bloque de 4 bloques -Tratamientos establecidos en columnas y surcos -Muestras tomadas a 0.225, 0.25, 0.275, 0.30, 0.35, 0.40, 0.50 y 0.70 metros de profundidad -Realización de 4 réplicas -Cada parcela cuenta con dimensiones de 6x20m con un área total de 20m² -Aplicación de fertilizante mineral 	0,4 y 12 toneladas de biosólidos por hectárea cada 12 años	30 años	<ul style="list-style-type: none"> -COS: Aumento significativo. Mayor en la aplicación de SS que en el fertilizado con nitrógeno. Aumento de 4 a 4,8 Mg/ha. Cambio entre el 32 al 47% de contenido de COS - Nitrógeno Total: Petersburgo: nitrógeno total varió entre 3,1 a 4,8% e Igelösa entre 2,4 a 5,5%. - Densidad Aparente: Tratamiento sin aplicación 1,68 Mg/m³. Con aplicación de SS disminuyó a valores de 1,59 Mg/m³ y 1,56Mg/m³
(Kalisz et al., 2017)	<i>Labile organic carbon fractions after amendment of</i>	<ul style="list-style-type: none"> -Dos experimentos de cuatro réplicas -Propiedades del biosólido tenidas en 	0,30,60,90,120 y 150 toneladas de	3 años	-COS: Decrecimiento en tratamientos con dosis de 30- 60 y 90 t/ha a

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén- Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

	<i>sandy soil with municipal sewage sludge and compost</i>	cuenta: materia seca, carbono orgánico, pH, nitrógeno total, fósforo total, potasio total y calcio -Mezcla de los biosólidos con los suelos a una profundidad de 10cm	biosólidos por hectárea		comparación del suelo control. Pasó de 17945 kg/ha a 17,488 17412 y 16948 kg/ha respectivamente. Los de menor dosis. Pudo haber sido por la rápida mineralización debido a las condiciones climáticas Aumento en los de mayor dosis a 20993 y 18324 kg/ha
(Guacaname & Barrera, 2007)	<i>Efecto de la aplicación de biosólidos como enmienda orgánica, en la recuperación de un suelo disturbado por actividad extractiva en la cantera de Soratama, localidad de Usaquén, Bogotá</i>	-Conformación de 12 parcelas de dimensiones 4mx4,5mx30cm -Análisis de las propiedades fisicoquímicas del biosólido (carbono orgánico, pH, nitrógeno total, fósforo, potasio, calcio, magnesio, sodio, CIC, bases totales, conductividad eléctrica) -Análisis de blanco de campo -Cuatro muestreos trimestralmente	Control 1:0 T1 (8:1) T2 (4:1) T3 (2:1) v/v de estéril y biosólido	9 meses	-pH: Aumento significativo en el pH pasó de 4,6-5,5 a 6,6-7,8. Tendieron a disminuir en el tiempo - CE: Un incremento significativo de la conductividad eléctrica según la dosis de biosólido. Pasó de 0,13 a 5 dS/m con la mayor dosis -COS: Aumento de CO proporcional a la dosis. Tiende a aumentar en el tiempo. Tratamiento 1 pasó de 0,09 a 0,2%, tratamiento 2 pasó de 0,09% a 0,5% y tratamiento 3 paso de 0,09 a 0,9% - Nitrógeno Total: No hubo gran variación en los niveles de nitrógeno total. Pasó de 0,003 a 0,15 con la mayor dosis -CIC: Aumentó proporcional y significativamente con respecto a la dosis de biosólido. Tiende a fluctuar. Paso de 0,95 a 4 con la mayor dosis de biosólido - Fósforo disponible: Aumento del fósforo disponible >88,3 ppm proporcional a las dosis aplicadas en especial en el último trimestre. A

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén- Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

					comparación de las parcelas control donde las cantidades de fosforo fueron bajas <15 ppm - Densidad aparente: Disminución de la densidad aparente por la integración del biosólido con la fracción mineral. Pasó de 1,60 a 1,20 g/cm ³
(Pitombo et al., 2015)	<i>Carbon sequestration and greenhouse gases emission in soil under sewage sludge residual effects</i>	-Conformación de 12 parcelas con dimensiones de 4x25m con un declive uniforme de 10%, separadas por bordes y marcos de cemento de 2m - Implementación de tres tratamientos con 4 réplicas incluyendo un control y dos tratamientos con aplicación de biosólidos - Al suelo control se le aplicó fertilizante en una dosis de 120 Kg N/ha -Aplicación de fertilizante fosforados a los tratamientos	1SS- 10 Ton/ha/año 2SS – 20 Ton/ha/año	7 años	-COS: Aumentó con mayor dosis. En la menor dosis se obtuvo un 79%, 56% y 7% más alto que el control y en el de mayor dosis se obtuvo 163%, 121% y 22% mayor -Nitrógeno Total: Mostró alta correlación con contenido de C r=0,996. Menor dosis 68% y 60% mayor que en el suelo control y en el de mayor dosis 174% y 118% mas que en el suelo control. -C/N: Control: 12,29 Dosis menor: 12,58 y dosis mayor: 12,23 -Temperatura edáfica: Temperatura depende de la mineralización de la materia orgánica. Entre más MO esté disponible mayor serán los efectos sobre la temperatura - Densidad aparente: Disminución de densidad aparente. Pasó de 1,17 a 1,08 en la dosis menor y 1,07 en la dosis mayor. Alta correlación entre C y DA debido a que afecta en la porosidad
(González-Ubierna et	<i>Sewage sludge application in Mediterranean Agricultural</i>	-Selección de dos tipos de biosólidos: aeróbicos (adición de oxígeno para su	40,80 y 160 ton/ha con	2 años	- Disminución de pH en 1,3 unidades en mayor dosis

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén- Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

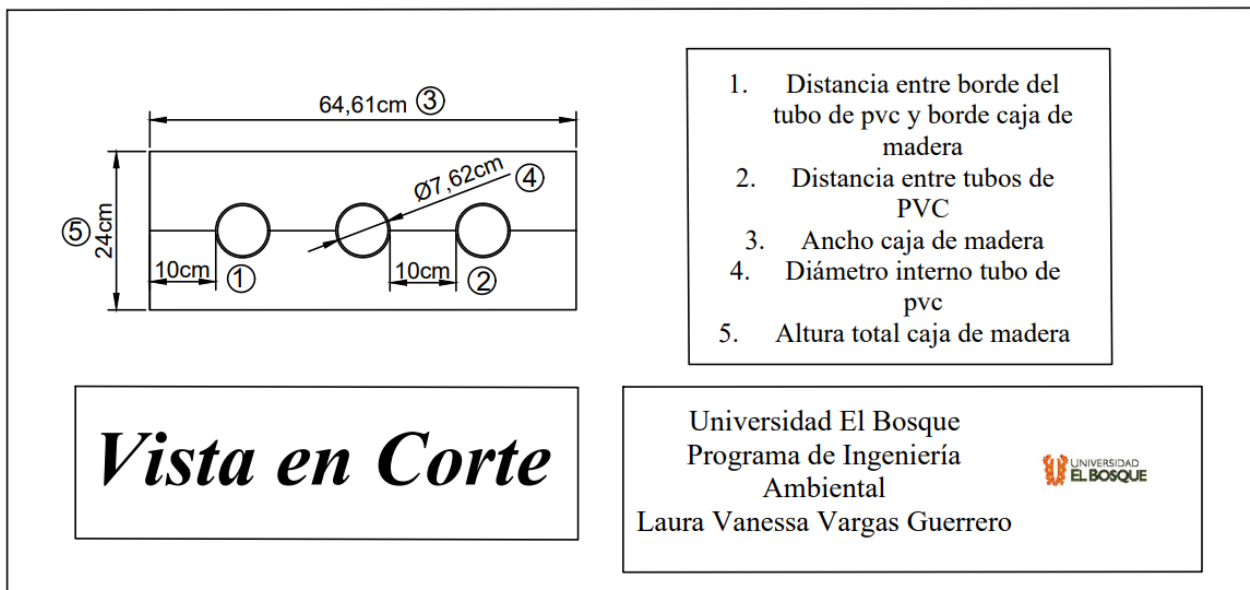
al., 2013)	<i>soils: Effects on doses on the soil carbon cycle”</i>	estabilización) y anaeróbicos -Selección de parcelas con dimensiones de 10x15m cada una -Ejecución de tres réplicas por cada tipo de lodo -Recolección de datos tres veces en los dos años y bimestralmente se realizaba análisis de CO ₂ - Prueba control y dos tipos de enmienda orgánica - Distribución de 8 parcelas por bloque: tres parcelas con aplicación de lodo aeróbico, tres con lodo anaeróbico y dos blanco	distribución de 8 parcelas por bloque		- Incremento de CE de 0,5dS/m con mayor dosis - Incremento proporcional al inicio del proyecto, luego de dos años se reduce. Se alcanza un máximo de 160 Mg/ha luego de un año de aplicación
------------	--	---	---------------------------------------	--	---

Fuente: Autora, 2023

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

De acuerdo con lo anterior, para el diseño del sistema de tratamientos se tuvo en cuenta los artículos realizados por Soriano-Disla et al., (2010) y Potisek Talavera et al., (2010) los cuales establecen columnas de PVC de 30cm de longitud y 12 cm de diámetro interno, y 75 cm de longitud y 10,2 cm de diámetro interno respectivamente, debido que obtuvieron resultados positivos en cuanto al aumento de la concentración de carbono orgánico a corto plazo que directamente representa la mejora de propiedades fisicoquímicas como el pH, la conductividad eléctrica y el porcentaje total de nitrógeno. No obstante, para el presente proyecto se modificaron las dimensiones del tubo de PVC, eligiendo un diámetro de 7,62cm (3"), longitud de un metro como se puede observar en la Figura 20 y orificios en la superficie distanciados cada 10 cm con el fin de permitir la aireación del sistema y simular lo propuesto por González-Ubierna et al., (2013).

Figura 20. Plano en corte del sistema de tratamientos



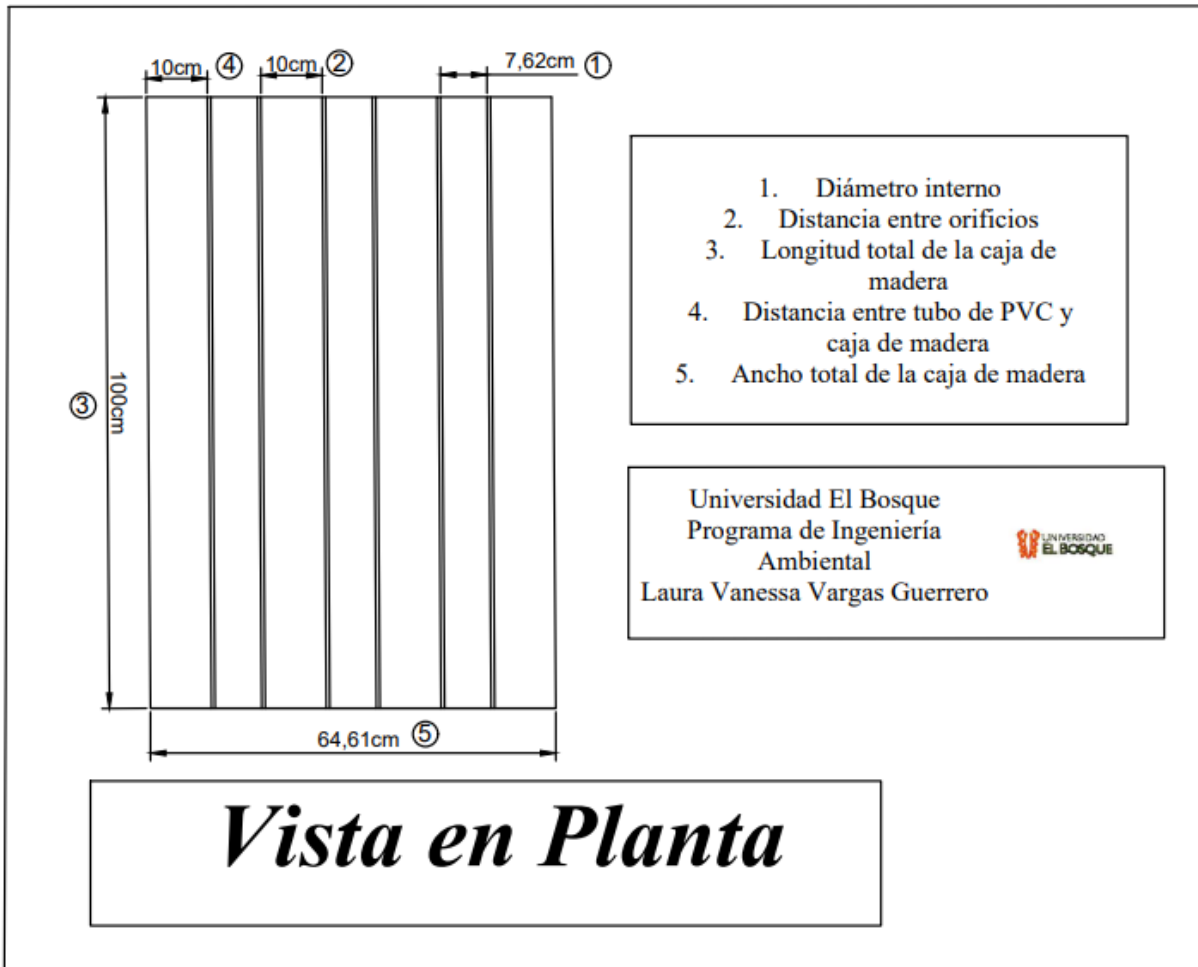
Fuente: Autora, 2023

En lo que concierne al número de tratamientos y réplicas se decidió establecer tres tratamientos con diferentes dosis de suelo: biosólido que son:

- Tratamiento 0 / Control: Dosis 1:0
- Tratamiento 1: Dosis 1:2
- Tratamiento 2: Dosis 1:4

Cabe destacar que se realizaron tres réplicas por cada tratamiento debido a que es el número promedio de experimentos identificados por los autores revisados en la Tabla 12. Ante esto, se afirma que en total se tendrán nueve tubos de PVC repartidos en tres cajas de madera con dimensiones de 70 cm de ancho, 24 cm de alto, 1 metro de largo y una distancia entre tubos de 10cm (Figura 21).

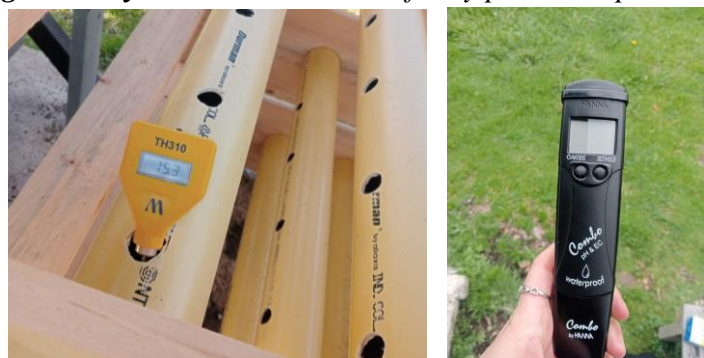
Figura 21. Plano en planta del sistema de tratamientos



Fuente: Autora 2023

Este prototipo estuvo bajo temperatura ambiente en las instalaciones de la Universidad El Bosque-Sede Chía, recibiendo riego por aspersión dos veces a la semana siguiendo lo establecido por Soriano-Disla et al., (2010) y siendo sometidas a mediciones semanales de los parámetros de pH, conductividad eléctrica y temperatura edáfica haciendo uso de instrumentos como el termómetro edáfico y el pH metro portátil a una relación 1:1 de suelo y agua destilada, y extrayendo el material de los tubos de PVC al azar (Figuras 22 y 23).

Figuras 22 y 23. Termómetro edáfico y pH metro portátil



Fuente: Tomadas por Autora, 2023

Es importante mencionar que los instrumentos utilizados durante el monitoreo en los 4 meses que se desarrolló la fase experimental fueron suministrados por el laboratorio de la Universidad El Bosque-Sede Chía.

Metodología del objetivo específico No.3. Comparar la eficiencia de las dosis del tratamiento de biosólidos sobre los procesos de recarbonización y recuperación de algunos indicadores de calidad del suelo como alternativa sostenible.

Para comparar la eficiencia de las dosis del tratamiento de biosólidos sobre los procesos de recarbonización y recuperación de algunos indicadores de calidad del suelo, se desmontó el prototipo instaurado durante la fase de diseño experimental para posteriormente enviar a analizar algunos de los parámetros físicos y químicos de las tres dosis aplicadas (1:0, 1:2 y 4:1) en el Laboratorio Nacional de Suelos del IGAC, mientras que la determinación de la mayoría de los parámetros físicos de las muestras, como densidad real, densidad aparente, estabilidad estructural, humedad gravimétrica y porosidad se desarrollaron en las instalaciones del laboratorio de la Universidad El Bosque; esto con el objetivo de comparar los valores obtenidos al inicio y al final del funcionamiento del prototipo.

Posteriormente, para el análisis estadístico y comprobación de las hipótesis nula y alternativa se estimó el valor del Coeficiente de Pearson y se aplicó la prueba T-Student. Cabe destacar que la hipótesis nula de la presente investigación es *“Todas las dosis de biosólidos de los tratamientos evaluados contribuyeron en la recarbonización y recuperación del suelo de la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición”* mientras que la hipótesis alterna es *“Al menos una dosis de biosólidos del tratamiento evaluado contribuyó a la recarbonización y recuperación del suelo de la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición”*.

Conforme a ello, el coeficiente correlación lineal también conocido como coeficiente de correlación producto momento de Pearson r , mide la fuerza de la relación lineal entre los valores cuantitativos apareados x y y en una *muestra* que para el caso de la presente investigación es la relación entre los indicadores físicos y químicos de calidad del suelo con el carbono orgánico del suelo (COS) (Triola, 2009). Adicionando a lo anterior, se realizaron gráficos de dispersión con el objetivo de visualizar el coeficiente de correlación de Pearson entre la variable dependiente frente a las variables independientes.

Por otro lado, la T- Student se diseñó para examinar las diferencias entre dos muestras independientes y pequeñas que tengan distribución normal y homogeneidad en sus varianzas y se desarrolla a partir de los siguientes pasos (Sánchez Turcios, 2015):

1. Probar que cada una de las muestras tiene una distribución normal (By Student, 1908).
2. Obtener a) el tamaño de las muestras (n_1 y n_2) b) sus respectivas medias (m_1 y m_2), c) sus varianzas (v_1 y v_2) (By Student, 1908).
3. Probar que las varianzas sean homogéneas (By Student, 1908).
4. En caso de homogeneidad en esas varianzas: a) establecer la diferencia entre las medias: $m_1 - m_2$, b) calcular la varianza común de las dos muestras a través de la siguiente ecuación (By Student, 1908).

$$vc = ((n_1 - 1)v_1 + (n_2 - 1)v_2)/(n_1 + n_2 - 2)$$

Ecuación 13. Varianza común de las muestras (By Student, 1908)

Donde la varianza común (vc) es igual a un promedio pesado de las varianzas de las dos muestras en donde los pesos para ese promedio son iguales al tamaño, menos uno ($n-1$) para cada una de las muestras. c) con esa varianza común, se calcula el error estándar de la diferencia de las medias (By Student, 1908).

$$ESM = \sqrt{\left(\frac{(vc)(n_1 + n_2)}{n_1 n_2}\right)}$$

Ecuación 14. Error estándar, diferencia de las medias (By Student, 1908)

5. Finalmente, la T-Student es igual al cociente de la diferencia de medias entre el ESM anterior (By Student, 1908).
6. De acuerdo con la hipótesis nula y alterna se debe demostrar que existe diferencia entre las medias de las muestras, se consulta una tabla de T-Student con grado de libertad igual a n_1+n_2-2 y se calcula el valor de P^5 (By Student, 1908).

Finalmente se generaron gráficos radiales para comparar las variables cuantitativas establecidas y visualizar la similitud o diferencia entre los valores obtenidos para los indicadores de calidad del suelo al inicio y final de la aplicación del tratamiento de biosólidos, o en su caso si existen valores atípicos frente a los valores estándar establecidos por el IGAC, (2021); así mismo, vale la pena señalar que este tipo de gráfico se compone de una secuencia de radios donde cada radio representa una sola variable, también son útiles para determinar que variables están apuntando a los valores altos o bajos dentro de un conjunto de datos (Triola, 2009).

7. Resultados, análisis y discusión

En esta sección se consolidaron los resultados obtenidos de acuerdo con la metodología establecida en la presente investigación, sumado a su posterior análisis con base en las tablas de interpretación de resultados seguido de la discusión la cual toma en cuenta los antecedentes recopilados, esta información se encontrará específica para cada objetivo.

7.1. Objetivo específico N°1. Diagnosticar las condiciones iniciales del suelo y de los biosólidos a través de la caracterización física y química.

El primer objetivo específico se centró en el diagnóstico de las condiciones iniciales del suelo de la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición que lleva funcionando aproximadamente dos años, a través de la evaluación de la matriz de aspectos e impactos ambientales, la matriz de Vicente Conesa y una ardua interpretación de los resultados obtenidos en los análisis físicos y químicos llevados a cabo en los laboratorios del IGAC, en las instalaciones de la Universidad El Bosque y en campo propiamente.

7.1.1. Interpretación Matriz de Aspectos e Impactos Ambientales y Matriz de Vicente Conesa

Para el desarrollo de la Matriz de Aspectos e Impactos Ambientales y Matriz de Vicente Conesa, se tuvo en cuenta lo descrito por Arango Salas & Forero Higuera, (2019) y lo observado durante la visita realizada a la zona de estudio afirmando que para el desarrollo de una Planta de Tratamiento de RCD (residuos de construcción y demolición) se requieren equipos como básculas, retro cargador de llantas, trituradora, volquetas y bulldozer, además se requiere un patio de maniobra

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

para los procesos de recepción y descargue de volquetas, patio de clasificación, patio de acopio y zona de rellenos.

Por lo tanto, estos procesos fueron considerados como los ASPI (aspectos susceptibles a producir el impacto) que de acuerdo a la metodología de matriz de aspectos e impactos ambientales son las acciones del proyecto que generan de manera directa o indirecta cambios en varios de los componentes del ecosistema, ya sean bióticos, abióticos o socioeconómicos, tal como se pueden observar en las siguientes Tablas 13 y 14 respectivamente (Arboleda González, 2008).

Tabla 13. Matriz de aspectos e impactos ambientales

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén- Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

FARI			Medio Abiótico							Medio biótico				Medio socioeconómico			
			Suelos		Agua		Aire			Flora		Fauna		Población		Económico	
			Uso del suelo	Propiedades fisicoquímicas	Usos del agua	Calidad del agua	Emisión de material particulado	Emisión de GEI	Ruido	Fragmentación cobertura vegetal	Diversidad de especies	Hábitat	Diversidad de especies	Salud	Calidad de vida	Generación de empleo	Ingresos monetarios
ASPI																	
Etapas de funcionamiento Planta de Tratamiento de RCD	Proceso de recepción y descargue	Cargue de material con la retroexcavadora	X	X			X	X	X	X	X	X		X		X	X
		Transporte de material a la tolva de alimentación	X	X			X	X	X	X	X	X		X		X	X
		Cargue de material a la tolva de alimentación					X	X	X					X		X	X
		Trituración del material	X	X			X	X	X					X	X	X	X
	Patio de clasificación	Clasificación por granulometría												X	X	X	X
		Inspección del material												X	X	X	X
	Zona de relleno	Almacenamiento de productos finales	X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X
	Disposición final	Alistamiento de productos para ventas	X	X	X	X								X	X	X	X
		Transporte para distribución	X	X			X	X	X	X		X		X	X	X	X

Fuente: Autora, 2023

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén- Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

Tabla 14. Matriz de Vicente Conesa

FARI			Medio Abiótico						Medio biótico				Medio socioeconómico				
			Suelos		Agua		Aire		Flora		Fauna		Población		Económico		
			Uso del suelo	Propiedades físicoquímicas	Usos del agua	Calidad del agua	Emisión de material particulado	Emisión de GEI	Ruido	Fragmentación cobertura vegetal	Diversidad de especies	Hábitat	Diversidad de especies	Salud	Calidad de vida	Generación de empleo	Ingresos monetarios
ASPI																	
Etapas de funcionamiento Planta de Tratamiento de RCD	Proceso de recepción y descargue	Cargue de material con la retroexcavadora	-44	-46			-50	-50	-43	-27	18	-36		-32		48	28
		Transporte de material a la tolva de alimentación	-42	-42			-35	-35	-29	-38	-31	-38		-29		33	38
		Cargue de material a la tolva de alimentación					-33	-33	-30					25		30	30
		Trituración del material	-38	-47			-36		-34					-36	-33	31	34
	Patio de clasificación	Clasificación por granulometría												-38	-33	31	34
		Inspección del material												-36	-33	31	34
	Zona de relleno	Almacenamiento de productos finales	-61	-62	-29	-39				-46	-33	-56	-33	-37	-26	36	36
	Disposición final	Alistamiento de productos para ventas	-44	-42	-35	-44								-32	-33	33	34
		Transporte para distribución	-48	-44			-52	-54	-50	-42		-37		-34	-33	36	36

Fuente: Autora, 2023

La matriz de aspectos e impactos ambientales que es de carácter cualitativo permitió identificar los impactos generados por cada una de las actividades sobre los medios abiótico, biótico y socioeconómico para posteriormente a través de la matriz de Vicente Conesa cuantificarlos e identificar si la importancia del efecto es compatible, moderado crítico o severo con cada uno de estos (Arboleda González, 2008). Estas matrices permitieron identificar que si bien el funcionamiento de una planta de RCD amortigua el efecto generado por este tipo de residuos en los ecosistemas, los procesos desarrollados durante la operación producen impactos moderados y críticos sobre los medios abióticos y bióticos, mientras que es compatible para el medio socioeconómico en cuanto es una actividad que genera empleo e ingresos monetarios. Dicho esto, a continuación se presenta el análisis de la evaluación del impacto ambiental para cada factor ambientales susceptible a recibir el impacto (FARI) (Arboleda González, 2008).

7.1.1.1. Medio abiótico

En primer lugar, para este factor se evaluó, el recurso suelo en cuanto al uso que se le otorga en la actualidad y propiedades físicas y químicas, el recurso hídrico referente a su uso y calidad; y el aire con el objetivo de identificar la perturbación que genera la actividad económica sobre los indicadores de material particulado, gases de efecto invernadero y ruido. Respecto al **suelo** se afirma que de acuerdo con la Figura 6 en la zona de estudio se está desarrollando una práctica inadecuada de uso del suelo, ya que la vocación es agrícola con orientación semi comercial y subsistencia y ganadería extensiva y semi-intensiva para producción de carne, lo que conlleva a un conflicto de uso de las tierras como se evidencia en la Figura 7 la cual indica que existe una subutilización del suelo (IGAC, 2022b).

Ante esto, cualquier actividad económica que no sea compatible con su gestión sostenible generará graves consecuencias en la salud del recurso suelo como se puede evidenciar en la matriz de aspectos e impactos ambientales y posteriormente en la de Vicente Conesa, donde los valores adquiridos para la importancia de la actividad sobre el recurso reflejan que claramente los procedimientos desarrollados en cada una de las etapas de operación, son de naturaleza negativa con un impacto moderado en su mayoría y crítico en la zona de relleno, debido a que durante esta etapa se presenta la formación de montículos de RCD (Figura 9) que alteran a largo plazo el curso natural de la vocación del suelo.

Por consiguiente, al no realizar las prácticas recomendadas del uso del suelo las propiedades físicas y químicas se van a ver alteradas en todas las fases de operación, haciendo especial énfasis en las etapas de proceso de recepción y descargue, y zona de relleno, en cuanto es necesaria la presencia de maquinaria pesada como volquetas, Bulldozer, montaje de la trituradora (Figura 24, A, B y C) generando así a futuro un posible proceso de compactación del suelo que de acuerdo con Hughes-DeJong et al., (2018) es el efecto de “empaque” de una fuerza mecánica sobre el suelo la cual disminuye el volumen ocupado en relación con la textura y contenido de humedad, incrementando la densidad aparente y tensión del suelo (Ávila Galeano, 2018; Laureda et al., 2016).

Figura 24. Maquinaria utilizada en etapa de recepción y descargue, y zona de relleno; volqueta y Bulldozer (A), Bulldozer (B), máquina trituradora (C)



(A)



(B)



(C)

Fuente: Tomadas por Autora, 2023

De acuerdo con la literatura, las propiedades químicas se ven alteradas por la acumulación de carbonato de calcio procedente de la aglomeración de lodos de piedra en la superficie del suelo que genera la formación de un tipo duro de cemento que evita la infiltración del agua y la adherencia de las raíces de las plantas en la capa del suelo, como se puede observar en las anteriores figuras Figuras 24, A, B y C ; así mismo, los residuos de lodo reducen la fertilidad de los suelos debido a los cambios en los valores de pH, CE (Conductividad eléctrica), salinidad y sólidos disueltos (Al-Joulani, 2008).

Con el exceso de calcio en el suelo se genera la inmovilización de elementos como hierro, boro, zinc y manganeso que producen el aumento de pH y CE, y la precipitación de dichos elementos; como consecuencia, la relación C:N disminuye debido a que si no se da el proceso de adaptación de la población microbiana esta se verá perjudicada y su tasa de mortalidad aumentará, lo que se traduce en poca mineralización de la materia orgánica del suelo (MOS) y disminución en la reserva de carbono y nitrógeno (Moyeja Santana, 2015; Shrestha & Lal, 2011).

Continuando con el **recurso hídrico**, si bien la planta de tratamiento de RCD no genera presión sobre un cuerpo de agua en específico, durante la fase de zona de relleno el agua de lluvia entra en contacto con los montículos y puede generar lixiviados peligrosos que llegan a las aguas subterráneas y las contaminan; por lo tanto, estas actividades de naturaleza negativa generan un impacto si bien moderado sobre el recurso hídrico, es de gran importancia y a tener en cuenta para su correspondiente manejo y control (Galvín et al., 2012).

Dado que los acuíferos se desplazan como auténticos ríos subterráneos, la carga contaminante puede desplazarse a muchos kilómetros del punto de origen, así mismo, al contar con una velocidad de circulación lenta los efectos de la contaminación son más letales y crónicos sobre los microorganismos presentes en el suelo principalmente, alterando claramente los ciclos biogeoquímicos debido a que la microflora y microfauna del suelo cumple un papel vital en el correcto funcionamiento de estos (Santos Marián et al., 2013). Ante esto, se puede afirmar que los principales cuerpos de agua que se verán afectados por la lixiviación de sustancias procedentes de los montículos son las quebradas como Torca, La Floresta, La Cita, San Cristóbal, Delicias del Carmen, Contador, La Chorrera, El Canal Callejas de la Calle 127, y que posiblemente pueden generar un riesgo a la salud en cuanto las comunidades ven afectadas su estado de completo bienestar físico, mental y social (Consejo Local de Gestión del Riesgo y Cambio Climático CLGR-CC, 2017; OMS - Organización Mundial de la Salud, 2023).

En lo que concierne a la calidad del **aire** este se ve altamente afectado por las emisiones de PM_{2,5}, carbono orgánico y carbono elemental que están clasificados como cancerígenos para los seres humanos por la Organización Mundial de la Salud, y que provienen del proceso de combustión que ocurre en los motores diésel, que son los utilizados en vehículos de carretera y no carretera, como por ejemplo los observados en la Figura 24 (A, B y C), los cuales generan afectaciones a la salud humana y cambio climático (Cui et al., 2021).

Además las emisiones gaseosas preocupantes provenientes del procesamiento de los residuos de construcción y demolición incluyen óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, óxidos de carbono, oxidantes fotoquímicos, COV (compuestos orgánicos volátiles), hidrocarburos y metano (Stocks & Down, 1984). Cabe destacar que estas emisiones normalmente se originan en equipos y procesos incluidos los motores diésel, mientras que las emisiones de material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}) resultan principalmente del desmonte y remoción de terrenos, excavaciones, trituración de materiales, carga y transporte de vehículos (Stocks & Down, 1984). Por tal razón, en la matriz de Vicente Conesa en las casillas correspondientes a la emisión de material particulado y gases de efecto invernadero la naturaleza del impacto generado principalmente por el desarrollo de procesos en las etapas de recepción de cargue y descargue, y transporte para distribución, es negativa, de nivel moderado a crítico.

Por último, teniendo en cuenta que el ruido es cualquier sonido molesto, otorgándole a este contaminante un carácter de percepción que se debe evaluar de manera metódica y según el marco normativo legal vigente para conocer su verdadero impacto en el ambiente y salud, en la matriz de Aspectos e Impactos Ambientales y de Vicente Conesa posee un impacto de naturaleza negativa de nivel moderado a crítico especialmente en las etapas de proceso de recepción, descargue y transporte para su distribución (Secretaría Distrital de Ambiente, 2023).

Cabe destacar que se tiene en cuenta el ruido porque la contaminación acústica es un problema grave emergente que amenaza la calidad de vida en las zonas urbanas a nivel mundial, haciendo especial énfasis el originado por las construcciones debido a que este se caracteriza por ser repentino, no permanente, de alta intensidad, de duración concentrada y de difícil control, lo que tienen un grave impacto en los residentes urbanos (Mir et al., 2023). Durante los últimos años, ha habido serias preocupaciones sobre los efectos negativos para la salud de la exposición al ruido de la construcción en áreas urbanas, debido a que puede afectar directamente la función homeostática del sistema nervioso autónomo (SNA) lo que aumenta el riesgo de enfermedades cardiovasculares (Mir et al., 2023).

7.1.1.2. Medio biótico

Con respecto al medio biótico correspondiente a la fauna y flora, se presenta la pérdida de hábitat, continuidad y diversidad del paisaje para el establecimiento de la trituradora y la creación de las zonas de descargue, acopio y de relleno, lo cual genera modificaciones permanentes en el medio que impiden el correcto ciclo de vida de organismos animales o vegetales por la perturbación de sus fuentes de alimentación y zonas destinadas para su reproducción (Santos et al., 2013).

Además de su valor intrínseco, el funcionamiento de la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición-RCDA altera los aspectos ecológicos, genéticos, sociales, económicos, científicos, educativos y culturales atribuidos a la fauna y flora, y que son indispensables para alcanzar el desarrollo sostenible y el bienestar de las comunidades (Arias Enríquez, 2021). Por tal motivo, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 15

“Vida de Ecosistemas Terrestres” fomenta el cese a la pérdida de biodiversidad con la participación de todos los organismos internacionales, organizaciones no gubernamentales y la sociedad civil como pila fundamental para el cuidado y conservación de esta (Arias Enríquez, 2021; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

7.1.1.3. Medio socioeconómico

Finalmente, lo que concierne al medio **socioeconómico** la planta de tratamiento de RCD genera empleo para su funcionamiento, debido a que se requiere de un personal idóneo para la realización de los diferentes procesos, operadores de maquinaria pesada, operador de trituradora, además de los administrativos y comerciales, confirmando lo establecido por Guerrero, (2023) quien comenta que el sector de la construcción es el sexto sector económico más importante de Colombia, representando el 5,1% del PIB del país, además es uno de los mayores generadores de puestos de trabajo lo que hace que su buen desempeño sea clave para lograr éxitos en otras variables como el desempleo y el consumo de los hogares (Arango Salas & Forero Higuera, 2019). Por lo tanto, en la matriz de Vicente Conesa (Tabla 14) se observa que la naturaleza del impacto es positiva siendo compatible en su totalidad con el aspecto económico.

No obstante, estar expuestos al ruido de las máquinas, a la emisión de material particulado y gases de efecto invernadero a largo plazo generan problemas de salud, debido a que de acuerdo con la EPA. United States Environmental Protection Agency, (2023) las partículas pequeñas de menos de 10 micrómetros de diámetro provocan mayores problemas dado que llegan a la profundidad de los pulmones y algunas hasta pueden alcanzar el torrente sanguíneo, afectando tanto a los pulmones como el corazón. De igual manera, múltiples estudios científicos vincularon la exposición a la contaminación por partículas a una variedad de problemas, que incluye: muerte prematura en personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, latidos irregulares, asma agravada, entre otros (EPA. United States Environmental Protection Agency, 2023).

En vista de que los gases de efecto invernadero fomentan el incremento del cambio climático al atrapar el calor y generar climas extremos, se altera el suministro de alimentos y aumentan los incendios forestales, afectando la salud y calidad de vida de los trabajadores y habitantes aledaños a la planta de tratamiento de RCD al presentarse la aparición de enfermedades respiratorias causadas por el *smog* y la contaminación atmosférica (Nunez, 2023). Por lo tanto, la naturaleza del impacto sobre el factor socioeconómico específicamente al ingreso monetario y generación de empleo es positivo con efecto compatible; mientras que los aspectos relacionados a la salud y calidad de vida tienen una naturaleza negativa con un efecto moderado en su mayoría.

7.1.2. Análisis del estado inicial del recurso suelo

Teniendo en cuenta los resultados de los análisis de laboratorio realizados en el IGAC correspondientes al mes de mayo del presente año, se obtuvo lo registrado en cuanto a las propiedades químicas del suelo en la Tabla 15 producto del procesamiento del Anexo I.

Tabla 15. Resultados iniciales del muestro de suelos, propiedades químicas

Parámetro evaluado	Técnica	Resultado
pH	Potenciométrico en relación suelo/agua 1:1	7,31
Carbono Orgánico	Walkley-Black y cuantificación por volumetría	1,59%
Materia Orgánica	Calcinación a 550°C y	2,75%

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

cuantificación gravimétrica		
Relación C: N	Calculada	11,39
Fósforo disponible	Bray II- Espectrofotométrico	45,09 ppm
Capacidad de Intercambio Catiónico	Extracción con Acetato de Amonio 1M pH 7- Volumétrico	12,15 meq/100
Nitrógeno Calculado	Kjeldahl y titulación potenciométrica	0,14%
Conductividad Eléctrica	Conductímetro	750 μ s/cm- 0,0075 dS/m

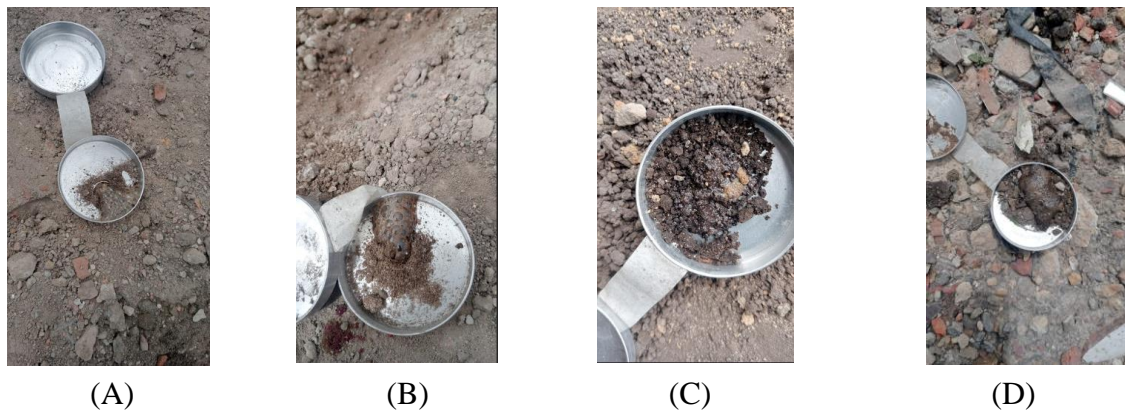
Fuente: Autora, 2023

7.1.2.1. Propiedades Químicas

El análisis inicial de las propiedades químicas se realizó a fin de diagnosticar el impacto del funcionamiento de la planta de tratamiento de RCD sobre estos indicadores de calidad y salud del suelo (Tabla 15) que para la presente investigación son herramientas de seguimiento para tener en cuenta para asegurar los procesos de recarbonización y recuperación del suelo, haciendo especial énfasis en el carbono orgánico en cuanto es el potencial oculto del recurso.

En primera instancia una de las pruebas cualitativas realizada fue reconocimiento de carbonatos donde se obtuvo una efervescencia fuertemente visible con la formación de burbujas y espuma espesa rápidamente como se observa en la secuencia de la Figura 25 (A, B, C y D), posiblemente esta reacción se le atribuye al uso actual del suelo.

Figura 25. Determinación de carbonatos; punto 1 (A), punto 2 (B), punto 3 (C) y punto 4 (D)



Fuente: Tomadas por Autora, 2023

Sin embargo, el **pH** para el suelo analizado es de carácter neutro como se observa en la Tabla 8 que indica una alta disponibilidad de **fósforo, nitrógeno** y azufre al estar cercano a 7 (6,5 a 7,5) debido a que dentro de este rango ocurre la mayor mineralización de fósforo y fijación biológica de nitrógeno llevada a cabo por microorganismos (Garavito, 1974).

Cabe destacar que el pH del suelo es una de las propiedades más importantes debido a que de él depende en gran parte la disponibilidad de nutrientes para las plantas porque determina su solubilidad, controla la clase y tipo de actividad microbiológica y por lo tanto la mineralización de la materia orgánica; de igual manera, tiene un efecto directo sobre la concentración de iones y sustancias tóxicas, la CIC (Capacidad de Intercambio Catiónico) en cuanto se tienen en cuenta que

al aumentar el pH se da origen a cargas negativas que quedan libres para intercambio, enfermedades de las plantas y otras propiedades importantes (Garavito, 1974).

De acuerdo con la USDA- United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation, (2016) la **conductividad eléctrica** es la conductividad electrolítica de un suelo saturado, expresado en decisiemens por metro a una temperatura de 25°C, además de ser una medida de la concentración de sales solubles en el suelo, es decir que permite indicar el nivel de salinidad del recurso. Cabe destacar que el suelo naturalmente tiene sales disueltas por lo que la CE puede ser muy baja pero nunca nula; así mismo, las sales benefician a los organismos pero en exceso puede afectar tanto el crecimiento de las plantas como la actividad de los microorganismos presentes en el suelo (USDA - United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation, 2016).

La USDA- United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation, (2016) indica las clases de salinización en suelos, como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Escala para clasificar los suelos según salinidad

Clases de salinización	Conductividad Eléctrica (dS/m)
No Salino	0 a < 2
Levemente salina	2 a < 4
Moderadamente salina	4 a < 8
Muy Salina	8 a <16
Extremadamente salina	≥16

Fuente: (USDA - United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation, 2016)

Teniendo en cuenta esta clasificación, la **conductividad eléctrica** para el suelo analizado es no salino, puesto que se obtuvo un valor de 0,0075dS/m indicando que no presenta restricción para ningún cultivo lo cual resulta positivo en cuanto el suelo es apto para utilizarlo de manera adecuada respetando su vocación y prácticas adecuadas pero presenta un nivel muy inferior de salinidad (Castellanos, 2000).

En cuanto a la **CIC**, es una medida de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo (arcilla, materia orgánica o sustancias húmicas) y representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4 , etc), los cuales serán intercambiados por otros cationes o iones de hidrógeno presentes en la solución del suelo y liberados por las raíces (FAO, 2023). El nivel de **CIC** indica la habilidad del suelo para retener cationes, disponibilidad y cantidad de nutrientes a la planta, su pH entre otras, por lo tanto, un suelo con bajo- medio **CIC** como el analizado en el presente proyecto según lo comparado con la Tabla 11 indica baja habilidad de retener nutrientes, con alto contenido de arena y pobre en materia orgánica (FAO, 2023).

Teniendo en cuenta las necesidades planteadas por RECSoil (Recarbonización de los suelos del mundo) el **carbono orgánico del suelo (COS)** como componente principal de la **materia orgánica del suelo (MOS)**, es el principal indicador de la salud del recurso y juega un papel crucial en el equilibrio global del carbono al regular procesos biogeoquímicos dinámicos y el intercambio de GEI, además, cumple un papel vital en la producción de alimentos, mitigación y adaptación del cambio climático; por lo tanto, resulta necesario implementar técnicas de recuperación para capturar y almacenar el COS como la ejecutada en la presente investigación que consiste en evaluar la

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

eficiencia del tratamiento de biosólidos en condiciones ex situ sobre suelos en la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición- RCD (Usaquén- Bogotá D.C.) como estrategia de recarbonización y recuperación (Jaramillo J., 2002; Lefèvre et al., 2017).

Por otro lado, el término MOS se utiliza para describir los constituyentes orgánicos en el suelo en diversas etapas de descomposición, tales como tejidos de plantas y animales muertos (Lefèvre et al., 2017). Un alto contenido en MOS proporciona nutrientes a las plantas y mejora la disponibilidad de agua, lo cual mejora la fertilidad del suelo y en definitiva mejora la productividad de los alimentos, además como se presenta en la Tabla 17 tiene efectos en su mayoría benéficos para todas las propiedades químicas del suelo (Jaramillo J., 2002; Lefèvre et al., 2017).

Tabla 17. Efecto general de la materia orgánica del suelo sobre algunas propiedades químicas

Propiedad	Efecto al aumentar el contenido de Materia Orgánica
CIC	Incrementa su valor. En términos generales, 1g de carbono orgánico aporta entre 3 y 4 meq a la CIC
pH	Disminuye
Capacidad Buffer	Aumenta
Nutrientes	Aporta algunos (N, P y S principalmente) durante el proceso de mineralización; puede ocasionar fijación de algunos elementos menores.
Biota	La principal fuente de energía para los organismos que viven en el suelo es la materia orgánica del mismo; algunos productos de su alteración pueden ser tóxicos para algunos de ellos.
Contaminación	La materia orgánica almacena compuestos y/o elementos tóxicos como algunos ingredientes activos no degradables de agroquímicos o metales pesados (Pb, Ni, entre otros), que llegan al suelo, dificultando su eliminación de este medio.

Fuente: (Jaramillo J., 2002)

Por consiguiente, el resultado obtenido para los parámetros de **materia orgánica y carbono orgánico** que refleja niveles bajos con valores de 2,75% y 1,59% respectivamente, según lo indicado en la Tabla 10, señala que en la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición no existen constituyentes orgánicos en estado de descomposición ya sea tejidos de plantas o animales muertos, por consiguiente, se presenta un bajo-medio valor de **CIC** como se expuso con anterioridad, así mismo, a pesar de contar con un **pH** neutro e indicado para el proceso de fijación del **nitrógeno** esto no ocurre puesto que se evidencia un porcentaje de 0,14% ,que de acuerdo con la Tabla 9 representa un valor bajo, es decir, que al no contar con un alto contenido de materia orgánica los microorganismos presentes no tienen a su disposición sustratos orgánicos para degradar y por consiguiente mineralizar y liberar así nutrientes para hacerlos disponibles para estos y para otras formas de vida como las plantas (Cerón & Aristizábal, 2012; Garavito, 1974).

En cuanto a la relación **C/N** este es un índice válido para la caracterización de la materia orgánica, que a su vez da una idea de lo disponible que puede estar el nitrógeno en el suelo y que este índice debe encontrarse entre límites bien definidos a fin de que los procesos biológicos desarrollados en el interior de la masa del suelo tengan un efecto positivo para la nutrición de las plantas (Pérez Toro, 2018; Sanz et al., 1975). Cuando la materia orgánica tiene alto contenido de nitrógeno, los microorganismos tienen suficiente sustrato para inducir mayor mineralización, debido a que la microflora (bacterias, hongos y actinomicetos) satisface plenamente sus necesidades de nitrógeno, por lo tanto no es un factor limitante, por el contrario si el contenido de nitrógeno es bajo, la tasa de

descomposición en la materia orgánica disminuye drásticamente y la tasa de mineralización de carbono dependerá de la adición de fuentes nitrogenadas (Pérez Toro, 2018).

Según lo reportado por (Pérez Toro, 2018) el valor promedio para la relación C/N es de 11, pero este valor puede variar entre 4 y 30 dependiendo del suelo, su contenido y tipo de materia orgánica, las condiciones ambientales y el uso y manejo que se le dé; por otro lado, Gamarra et al., (2018) establece que valores altos de este índice implican que la materia orgánica se descompone lentamente debido a que los microorganismos inmovilizan el nitrógeno por lo que puede ser utilizado por los vegetales, en cambio valores entre 10 y 14 corresponden a una mineralización y ruptura de tejidos rápida puesto que la actividad microbiana se estimula, hay nutrientes suficiente para los microorganismos y los vegetales. Por consiguiente, de acuerdo con el valor obtenido de esta relación que es de **11,39** como se puede observar en la Tabla 15 indica que es favorable.

Entre los tres elementos principales (N-K-P), el **fósforo** es requerido por las plantas generalmente en menores cantidades, sin embargo, su estudio ha adquirido la mayor importancia a causa de la baja disponibilidad de este elemento en la mayoría de los suelos agrícolas del mundo, no solo porque su contenido total es bajo sino a las múltiples reacciones que ocurren en el suelo que lo llevan a formas no asimilables (Garavito, 1974). Este elemento de manera natural proviene de las apatitas y depósitos de fosfato de donde es liberado a través de procesos de meteorización, lixiviación, erosión y extracción industrial como fertilizante, donde el fosfato que ha sido liberado paulatinamente de las apatitas lo absorben las plantas y la biomasa microbiana para luego incorporarse en la materia orgánica de los suelos y sedimentos, y nuevamente depositarse en formas minerales poco solubles (Cerón & Aristizábal, 2012).

Desde el punto de vista químico el P puede encontrarse de manera inorgánica y orgánica. El P inorgánico se clasifica de acuerdo con su disponibilidad en: i) en P intercambiable, también llamado lábil o adsorbido, cuya disponibilidad es más lenta que el anterior; ii) el P insoluble, que está formando parte de los minerales primarios y secundarios que constituyen la gran reserva del P inorgánico en el suelo y iii) P disponible, que es la forma aprovechable e inmediata, la cual corresponde a la analizada en los laboratorios del IGAC para el desarrollo de esta investigación donde se obtuvo un valor de 45,09 mg/Kg (ppm) que según lo indicado en la Tabla 9 es un nivel alto (Johnston & Syers, 2009).

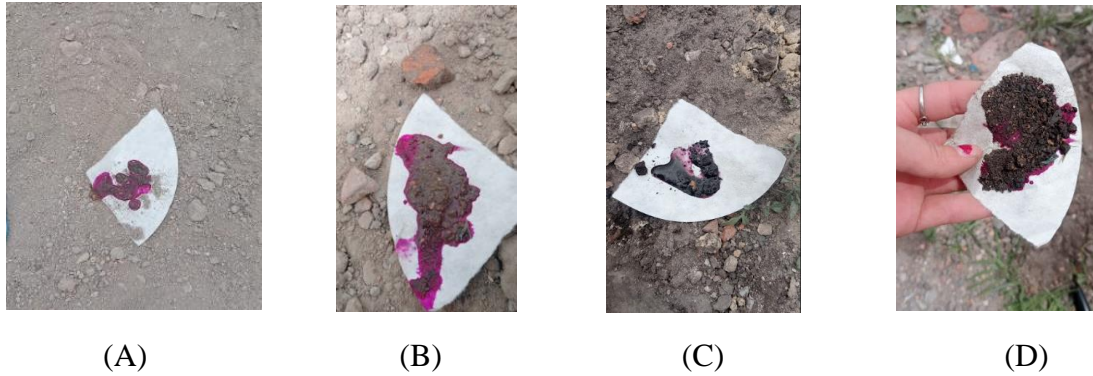
Teniendo en cuenta la vocación del uso del suelo (Figura 6) y la información sobre el historial de uso del suelo obtenida a través de comunicación personal de la zona donde actualmente se encuentra ubicada la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición -RCD, se puede afirmar que previo a la construcción de la planta pudo haberse desarrollado ganadería de subsistencia o cultivos donde se utilizó el estiércol bovino como abono orgánico como el caso de las áreas agrícolas del Valle de Juárez, Chihuahua, México (Flores Márgez et al., 2013). No obstante, el problema de este método radica en que los productores aplican el estiércol sin conocimiento de la dosis, las características físicas, químicas y de humedad de éste, ni de los parámetros físicos y químicos del suelo, causando así una excesiva aportación de fósforo en el suelo causando problemas de toxicidad y reducción de la disponibilidad de otros nutrientes para las plantas (Flores Márgez et al., 2013).

Finalmente, según Olivera Sánchez & Avellaneda Torres, (2018) la presencia de cenizas volcánicas en suelos son un indicador de posible toxicidad por aluminio y presencia de alófanos las cuales son aluminosilicatos no cristalinos que presentan una relación atómica Al/Si entre 1 y 2. No obstante, para la zona de estudio como se observa en la secuencia de Figuras 26 (A, B, C y D) claramente la reacción donde el NaF libera iones hidroxilos de la alófana produciendo el incremento positivo del

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

pH por encima de 9 y la coloración fucsia del papel indicador, concuerda con lo representado en la Figura 27 donde se confirma la presencia de alófanas dado que la litología del lugar corresponde a depósitos clásticos hidrogénicos en sectores de manto de ceniza volcánica (Olivera Sánchez & Avellaneda Torres, 2018).

Figura 26. Determinación de alófanas, punto 1 (A), punto 2 (B), punto 3 (C) y punto 4 (D)

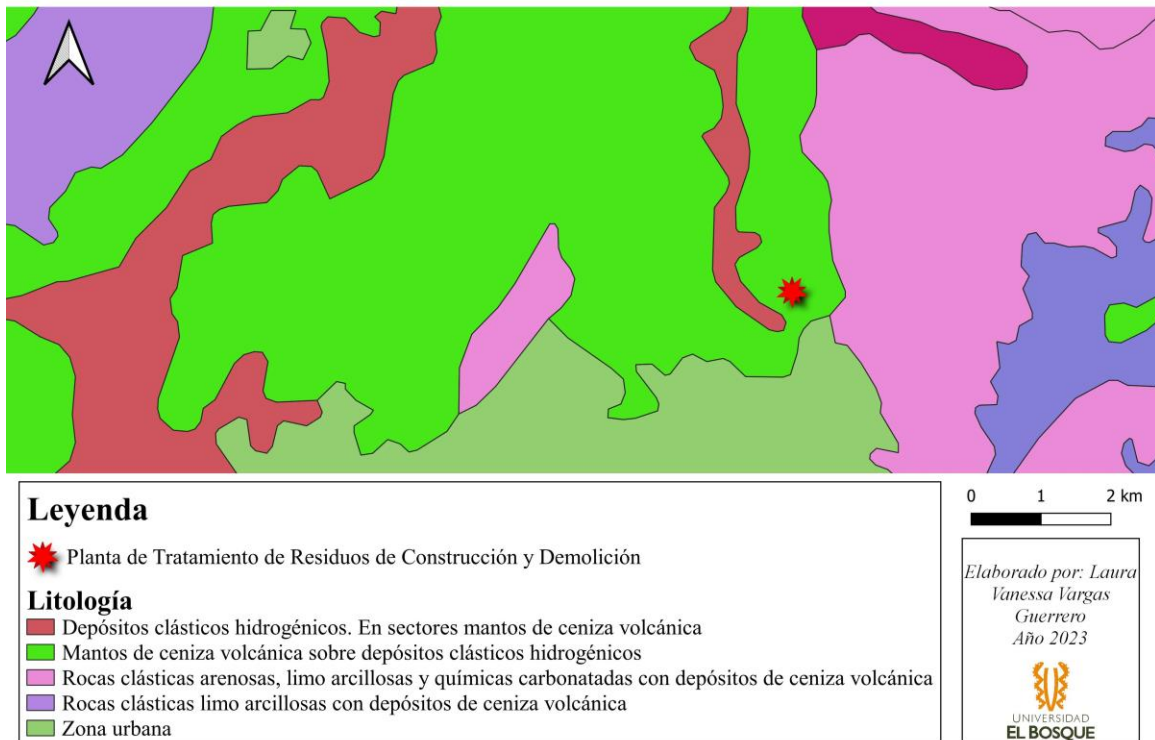


Fuente: Tomadas por Autora, 2023

Cabe resaltar que los depósitos clásticos identificados en el mapa, de color verde son fragmentos de ceniza y roca volcánica expulsada durante una erupción, mientras que los sedimentos hidrogénicos consisten en minerales que cristalizan directamente del agua marina mediante varias reacciones químicas, representando así una pequeña parte del total de sedimentos oceánicos (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Figura 27. Litología, zona de estudio

Litología, zona de estudio

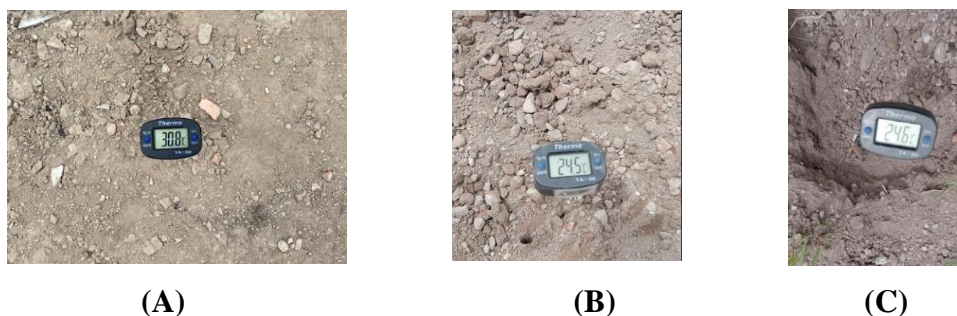


Fuente: Autora, 2023. Modificado de (IGAC, 2022b)

7.1.2.2. Propiedades físicas

Para empezar, la **temperatura** del suelo es una de las propiedades más importantes porque controla las posibilidades para el crecimiento de plantas y la formación de suelos (FAO, 2009). De acuerdo con la FAO, (2009) y según las mediciones realizadas en campo empleando el termómetro edáfico, el suelo característico de la presente investigación puede ser considerado Hipertérmico o Isohipertérmico debido a que cuenta con una temperatura media de 22°C o mayor, indicando que el suelo está desprovisto de vegetación como se logra observar en la secuencia de figuras a continuación, por ende, se presentan variaciones bruscas en el contenido de humedad y temperatura del suelo (Jaramillo J., 2002).

Figura 28. Temperatura edáfica; punto 1 (A), punto 2 (B) y punto 4 (C)



Fuente: Tomadas por Autora, 2023

Teniendo en cuenta los resultados de los análisis de laboratorio realizados en el IGAC y los ejecutados en las instalaciones del laboratorio de suelos ubicado en la Universidad El Bosque correspondientes al mes de mayo del presente año, se obtuvo lo registrado en cuanto a las propiedades físicas del suelo en la Tabla 18 producto del procesamiento del Anexo I y de los correspondientes cálculos especificados en la sección de metodología.

Tabla 18. Resultados iniciales del muestro de suelos, propiedades físicas

Parámetro evaluado	Técnica	Resultado
Textura	Hidrómetro de Bouyoucos	Franco arenoso
Densidad aparente	Cilindro metálico	0,30 (g/cm ³)
Densidad real	Picnómetro	1,61 (g/cm ³)
Diámetro ponderado medio	Yoder	0,027 mm
Estado de agregación	Yoder	41,07
Porosidad	Calculado	81,27%
Humedad de campo	Método gravimétrico	7,05%

Fuente: Autora, 2023

La **textura** siendo una propiedad exclusiva de la fase sólida del suelo y más específicamente de la fracción inorgánica de aquella, es fuertemente dependiente del material parental del suelo, además, es la propiedad que establece las cantidades relativas en que se encuentran las partículas de diámetro menor a 2mm, es decir, la tierra fina en el suelo, donde estas partículas llamadas separados, se agrupan en tres clases por tamaños: Arena (A), Limo (L) y Arcilla (Ar) (Jaramillo J., 2002).

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

Según lo obtenido en los análisis de laboratorio, el suelo es de clase textural **franco arenosa** identificada por tener una granulometría distribuida de la siguiente manera: Arena – 71,3%; Limo – 18,4% y Arcilla- 10,3% y que según lo establecido por Castellanos, (2000) es un suelo de textura gruesa caracterizado por tener una baja capacidad para retener nutrientes y agua debido a que presentan poros grandes que facilitan la lixiviación y volatilización de estos, coincidiendo con el estudio llevado por Ibarra et al., (2008) en donde identificó como limitante en la productividad de suelos aquellos que tienen una textura arenosa que presentan una reducida capacidad de intercambio catiónico como la presente en el suelo analizado cuyo valor se observa en la Tabla 15.

En tanto, la densidad de un material se define como el peso que tiene este por unidad de volumen, el suelo, al ser un cuerpo poroso, se presentan dos situaciones diferentes con respecto a la densidad: si se considera la masa de las partículas sólidas, únicamente se tiene la **densidad real**, pero si aparte de la masa de las partículas se tiene en cuenta su organización, entonces se tiene la **densidad aparente** (Jaramillo J., 2002).

La **densidad real** es la densidad de la fase sólida del suelo, es un valor prácticamente constante en la mayoría de los suelos y oscila en torno a $2,5 \text{ g/cm}^3$, donde la posible variación de este valor se debe normalmente al cambio de la cantidad de materia orgánica del suelo (Pulido et al., 2014). Para la presente investigación se obtuvo un valor de $1,61 \text{ g/cm}^3$ que es muy bajo según lo reportado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección de Agrología, (2015) indicando que el suelo puede poseer un alto contenido de yeso producto de la acumulación de los RCD. Cabe destacar que la determinación de este parámetro permite calcular la porosidad total del suelo, evaluar la concentración de los sólidos en suspensión y medir la velocidad de sedimentación de las partículas (Pinzón Pinto, 2003)

Mientras que , la **densidad aparente** del suelo se define como la masa de una unidad de volumen de suelo seco a 105°C ; este volumen incluye tanto sólidos como los poros, reflejando así la **porosidad** total del suelo, razón por la cual depende de la organización que presente la fracción sólida y está afectada por su textura, estructura, contenido de materia orgánica, humedad y grado de compactación, principalmente (FAO, 2009; Gómez, 2013).

Aunque Gómez, (2013) afirme que valores de densidad aparente bajos indican una condición porosa del suelo mientras que valores altos expresan un ambiente pobre para el crecimiento de raíces, aireación reducida y cambios indeseables en la función hidrológica como reducción de la velocidad de infiltración del agua, la FAO (2009) establece que una densidad aparente baja no indica necesariamente un ambiente favorecido. Debido a esto el resultado obtenido producto del desarrollo de la ecuación 2 que fue de $0,30 \text{ g/cm}^3$ y teniendo en cuenta lo atestiguado por Cortés & Malagón, (1984) se ratifica que el suelo a recarbonizar y recuperar en la presente investigación es más susceptible a la erosión eólica e hídrica en cuanto el arrastre de partículas se genera con mayor facilidad y tiene menor resistencia a la compactación porque puede comprimirse fácilmente bajo cargas externas como el tránsito de maquinaria pesada (Morgan, 2005)

Por otro lado, teniendo en cuenta que el valor de **porosidad** obtenido al desarrollar la ecuación 12 es de 81,27% se afirma que concuerda con lo expresado por Jaramillo J., (2002) debido a que se ilustra la relación inversa que existe entre la densidad aparente y porosidad. Cabe destacar que la porosidad al ser un parámetro que representa el volumen total de espacios porosos discernibles, al reducirse repercute en las propiedades físicas provocando una menor aireación del suelo, menor capacidad de infiltración de agua y dificultad para la penetración de las raíces; no obstante, para este caso y teniendo en cuenta la Tabla 19, el suelo presente una porosidad excesiva que genera un

efecto contraproducente, es decir drenaje y aireación excesiva, además de una baja capacidad de almacenamiento de agua (Jaramillo J., 2002).

Tabla 19. Calificación de la porosidad total del suelo

Porosidad Total (%)	Calificación
>70	Excesiva
55-70	Excelente
50-55	Satisfactoria
40-50	Baja
<40	Muy baja

Fuente:(Kaurichev, 1984)

Por lo que se refiere a la **estabilidad estructural** se obtuvo una distribución y estado de agregación según la Tabla 6 y Tabla 7 respectivamente inestable y muy baja, en cuanto se obtuvo un valor de diámetro ponderado de 0,027 mm a través del desarrollo de las ecuaciones 3 a la 7 y un valor de estado de agregación de 41,07 , siendo la formación de la estructura un proceso fundamental del suelo e indispensable para tener un medio físico edáfico adecuado debido a que este parámetro define en gran medida la intensidad y el tipo de uso y manejo (Jaramillo J., 2002).

Cabe destacar que los principales agentes que perturban la estructura son las gotas de lluvia, la mecanización, la presencia de ciertos cationes como el sodio, las condiciones inadecuadas de humedad y el déficit de coloides en el suelo, entre otros. (Jaramillo J., 2002) Por otro lado, este indicador del suelo está controlado por ciertos factores como que a mayor contenido de arcilla y de materia orgánica hay mayor estabilidad, a menor laboreo y mayor población microbiana, mayor estabilidad, entre otros (Jaramillo J., 2002). Ante esto, se puede afirmar que posiblemente el suelo es inestable porque tiene un menor contenido de arcilla a comparación de los otros tipos de granulometría (limo, arena), por presentar un bajo contenido de materia orgánica y por contar con una alta y constante intervención antrópica (Jaramillo J., 2002).

Finalmente, el suelo está compuesto por tres fases principalmente; fase sólida, conformada por los productos del proceso de intemperización de la roca madre, minerales y materia orgánica; la fase gaseosa está formada por aire y vapor de agua, y la fase líquida, que es una solución acuosa de composición química variable que llena parte o la totalidad de los espacios porosos (Gómez, 2013). Esta fase líquida, más conocida como humedad, es uno de los factores más importantes que afecta la producción de cosechas debido a que las plantas requieren una cantidad adecuada de ella y varía de acuerdo a la especie y al estado de crecimiento o desarrollo; por otro lado, el suelo es capaz de almacenar una cantidad limitada de agua, y de esta solo una parte es utilizada por las plantas (Gómez, 2013).

Así pues, es esencial conocer el contenido de agua por unidad de masa de suelo o más conocida como **humedad gravimétrica** (relación entre la masa de la fracción líquida y la masa de la fracción sólida) debido que permite obtener información valiosa para poder entender varias de las propiedades químicas, mecánicas e hidrológicas del suelo que afectan el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Gómez, 2013). Este parámetro se calcula a través de la Ecuación 3 e indica el porcentaje de humedad que contiene cierta cantidad de suelo, que para el caso del suelo analizado se obtuvo un valor de 7,06% indicando que por cada 100 gramos de suelo hay 7,06 gramos de agua.

Dicho esto se afirma que es un valor bajo debido a que se encuentra dentro del rango de 5-15% de contenido de humedad, teniendo en cuenta lo establecido por el Instituto Geográfico Agustín

Codazzi. Subdirección de Agrología, (2015), así mismo, el suelo al ser arenoso posee un diámetro promedio de los poros mayor que en suelos arcillosos fomentando una alta velocidad de infiltración del agua reflejándose en una baja retención de humedad (Flores delgadillo & Alcalá Martínez, 2010). Es importante mencionar que el porcentaje de humedad gravimétrica puede influir en la densidad aparente, porosidad, compactación, penetrabilidad, resistencia al corte, consistencia y color del suelo (Flores delgadillo & Alcalá Martínez, 2010; Gómez, 2013).

7.1.3. Análisis de las propiedades químicas del biosólido

Teniendo en cuenta los resultados de los análisis de laboratorio realizados en Agrilab correspondientes al mes de mayo del presente año, se obtuvo lo registrado en cuanto a las propiedades químicas del biosólido en la Tabla 20 producto del procesamiento del Anexo II.

Tabla 20. Resultado de las propiedades químicas del biosólido

Parámetro evaluado	Técnica	Resultado
Humedad	Gravimetría	89,6%
pH	Potenciométrico	6,74
Conductividad Eléctrica	Conductímetro	10,7 dS/m
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	Volumétrico	5,42 meq/100
Carbono Orgánico Oxidable	Colorimétrico	1.89%
Relación C/N	Relación Matemática	14
Nitrógeno Orgánico	Volumetría / Micro-Kjeldah	0,133%
Nitrógeno Total	Sumatoria de especies de nitrógeno	0,133%

Fuente: Autora, 2023

Los lodos son usualmente tratados con el objetivo de mejorar sus propiedades químicas antes de otorgarles un uso o disposición final, cabe destacar que uno de los principales motivos del tratamiento de lodos se enfoca en la reducción del contenido de agua, masa del lodo, controlar olores y destruir patógenos (EPA. United States Environmental Protection Agency, 1984).

La acidez del biosólido medido en unidades de **pH** interviene en la disponibilidad de metales pesados, el contenido de patógenos y en la corrosividad de este, siendo un pH alto (mayor a 11) el causante de la destrucción de microorganismos importantes y en conjunto con un pH alto o neutro en suelos de la inmovilización de metales pesados en el recurso o hasta en las plantas; por el contrario, un pH ácido (menor a 6,5) en el biosólido, promueve la lixiviación de los metales pesados y por tanto una mayor absorción de estos en los cultivos (EPA. United States Environmental Protection Agency, 1984). Ahora bien, debido a que el valor registrado para el biosólido implementado en la presente investigación es de 6,74, se afirma que es un valor donde no se presenta los escenarios mencionados y no hay problema en la aplicación de este sobre los suelos, su distribución o vertedero, no obstante, se encuentra cercano al límite inferior de 6,5 por lo tanto se deben considerar la aparición de ciertos efectos negativos sobre el suelo a recuperar.

En lo que concierne al **porcentaje de humedad** se obtuvo un valor de 89,60% el cual es superior a los registrados por González-Ubierna et al., (2013) y Pitombo et al., (2015) que como se observa en la Tabla 21 son valores que no sobrepasan el 70%. La **conductividad eléctrica** del biosólido implementado tiene una magnitud de 10,7dS/m la cual se encuentra dentro del rango de valores hallados por los autores de los artículos desarrollados en España en las ciudades de Madrid y Alicante, el cual es de 1,2 a 14,35 dS/m (González-Ubierna et al., 2013; Soriano-Disla et al., 2010).

Tabla 21. Propiedades físicas y químicas de biosólidos en diferentes países

Propiedades	País				
	México	India	España	Brasil	Colombia
Humedad (%)			14,20% ^c	68% ^f	
pH	7,07 ^a	6,16-7,5 ^b	7,1-8,2 ^{b, c, d}	6,6 ^f	7,3- 7,6 ^{g, h}
CE (dS/m)	5,68 ^a	2,28-2,7 ^b	1,2-14,35 ^{b, c, d}		4,4 ^g
CIC (meq/100)					33,8 ^g
COOx		5,52-12,6% ^b	234 g/kg- 444 g/kg ^{b, c, d}	279 g/kg ^f	11,7% ^g
C/N			10,3- 12 ^{c, e}		
Nitrógeno Total	1,74% ^a	1,6-1,73% ^b	37 g/kg ^e	29 g/kg ^f	1,7% ^g

Nota: ^a Potisek Talavera et al., (2010). ^b Kanteraki et al., (2022). ^c (González-Ubierna et al., 2013). ^d(Soriano-Disla et al., 2010). ^e (Almendro-Candel et al., 2007). ^f Pitombo et al., (2015). ^g Guacaname & Barrera, (2007). ^h Peñarete M et al., (2020)

Dado que para el parámetro de **capacidad de intercambio catiónico** a nivel internacional no se encontraron valores, se tuvo en cuenta el detectado por Guacaname & Barrera, (2007) en la ciudad de Bogotá D.C., Colombia. Ante esto, se afirma que el biosólido presenta un valor óptimo debido a que no sobrepasa ni se acerca al establecido por los autores del artículo el cual es de 33,8 meq/100. Referente a la **relación carbono/ nitrógeno (C/N)** se reportó por parte del laboratorio de Agrilab un valor de 14 que sobrepasa el rango encontrado en los artículos de González-Ubierna et al., (2013) y Almendro-Candel et al., (2007) que es de 10,3 a 12.

Finalmente, según la EPA. United States Environmental Protection Agency, (1976) los biosólidos contienen de 1 a 6% de contenido de **nitrógeno** que corresponde a la fracción orgánica e inorgánica, donde el 30 al 60% del nitrógeno total en los biosólidos fluidos asimilados anaeróbicamente, está presente en forma amoniacal y el resto en forma orgánica que no se encuentra disponible para las plantas pero cuenta con la particularidad de no volatilizarse a comparación de la fracción inorgánica. Por lo tanto, el valor de 0,133% obtenido para el biosólido utilizado en la presente investigación, es demasiado bajo a comparación de lo recomendado por la EPA. United States Environmental Protection Agency, (1976) y de los demás estudios realizados a nivel mundial donde se evidencian porcentajes de 1,6% a 1,73% como se puede observar en la Tabla 21.

7.2.Objetivo Específico N°2. Diseñar un prototipo ex situ para monitorear el proceso de recarbonización y recuperación de suelos bajo condiciones controladas.

A continuación se presentan los resultados, análisis y discusión del segundo objetivo, el cual se centró en el diseño y construcción del prototipo de recuperación de los tratamientos de suelos bajo condiciones controladas y el monitoreo de los parámetros de pH, conductividad eléctrica,

temperatura edáfica, temperatura ambiente y humedad para así sintetizarlos en bitácoras y facilitar su comprensión.

7.2.1. Construcción prototipo de recuperación de los tratamientos de suelo bajo condiciones controladas

Teniendo en cuenta las dimensiones planteadas en los planos (Figura 20 y 21) se le solicitó a un ebanista construir tres cajas de madera de pino debido que de acuerdo con comunicación personal, (16 de mayo de 2023) este material es resistente a las condiciones ambientales externas es decir precipitaciones fuertes, magnitudes de radiación solar elevadas, variaciones de temperatura; además, es higroscópico es decir que absorbe la humedad del ambiente y su proceso de degradación tarda de entre 5 a 10 años, lo cual se ajustaba a las necesidades del proyecto (Suirezs & Berger, 2009). Ante esto, los resultados obtenidos en cuanto a la construcción de las cajas de madera se evidencian en la serie de Figuras 29 (A y B) donde se expone la vista en corte y planta.

Figura 29. Caja de madera, vista en corte (A), vista en planta (B)



Fuente: Tomadas por Autora, 2023

Con respecto a los tubos de PVC se adquirió un tubo de seis y tres metros para posteriormente cortarlos y extraer en total nueve tubos con una longitud de un metro cada uno, a los cuales se les realizó seis orificios que se distancian entre sí cada diez centímetros como se puede observar en la Figura 30.

Figura 30. Tubo de PVC



Fuente: Tomada por Autora, 2023

Posteriormente, a cada uno de los tubos se les agregó el suelo control, el suelo más biosólido en proporción 2:1 y 4:1, teniendo en cuenta que cada uno de los tratamientos contaba con tres réplicas. Finalmente, para el montaje de los sistemas de tratamiento cada tubo de PVC se insertó en el agujero destinado empleando angeo en las terminaciones de los tubos con el objetivo de que no se pierda el suelo. Una vez terminada la caja con los tres tubos, por cada tratamiento se colocaba la siguiente encima, hasta que quedara un tipo de “torre” como se observa en la Figura 31 (A y B), cabe destacar que la caja base corresponde al tratamiento 2 con proporción suelo: biosólido 1:4, seguido del tratamiento 1 con proporción suelo: biosólido 1: 2 y por último el suelo control o tratamiento 0 con proporción 1:0.

Figura 31. Construcción sistema de tratamientos, puesta de cada tubo de PVC en el agujero (A), sistema de tratamientos (B)



(A)



(B)

Fuente: Tomadas por Autora, 2023

7.2.2. Bitácoras de campo

Posterior al monitoreo y seguimiento de los parámetros de pH, conductividad eléctrica, temperatura edáfica, temperatura ambiente y porcentaje de humedad, se realizaron 4 bitácoras es decir una por cada mes divididos de la siguiente manera:

- Tabla 22: Mes 1, 19 de mayo a 19 de junio de 2023
- Tabla 23: Mes 2, 19 de junio a 19 de julio de 2023
- Tabla 24: Mes 3, 19 de julio a 19 de agosto de 2023
- Tabla 25: Mes 4, 19 de agosto a 16 de septiembre de 2023

Estas bitácoras se elaboraron con la finalidad de reportar los avances y resultados preliminares, incluyendo en orden cronológico con detalle, entre otras cosas, las observaciones, datos mínimos y máximos identificados para cada uno de los parámetros, acciones que se llevaron a cabo para el correcto desarrollo de la fase experimental, siendo imprescindibles en el transcurso del presente proyecto de investigación (Martínez, 2010).

Tabla 22. Mes 1 (19 de mayo de 2023- 19 de junio de 2023)

Mes 1 (19 de mayo – 19 de junio de 2023)										
Valores de medición (pH, CE y Temperatura Edáfica)										
Fecha	Día	Tratamiento 0			Tratamiento 1			Tratamiento 2		
		pH	CE (dS/m)	Temperatura Edáfica (°C)	pH	CE (dS/m)	Temperatura Edáfica (°C)	pH	CE (dS/m)	Temperatura Edáfica (°C)
30/05/2023	12	6,67	0,0121	17,90	7,27	0,0109	14,47	7,05	0,00898	14,50
01/06/2023	14	6,98	0,0114	14,20	7,34	0,0051	12,80	7,11	0,00718	13,73
06/06/2023	19	7,35	0,0099	15,17	5,88	0,0030	13,03	7,29	0,00634	13,40
08/06/2023	21	7,5	0,0069	17,93	7,66	0,0064	15,80	7,22	0,00631	16,70
14/06/2023	27	7,53	0,0064	16,93	7,61	0,0070	15,13	7,46	0,00522	14,83
16/06/2023	29	7,41	0,0076	14,93	7,62	0,0109	13,37	7,52	0,00556	13,10

Valores de medición, clima ambiental (Temperatura, %humedad)				Imágenes	
Fecha	Día	Temperatura ambiente (°C)	Humedad (%)		
30/05/2023	12	16	72		
01/06/2023	14	16	87		
06/06/2023	19	15	88		
08/06/2023	21	21	58		
14/06/2023	27	18	70		
16/06/2023	29	14	86		

Descripción
El montaje del prototipo se realizó el 19 de mayo de 2023, no obstante, hasta el 30 de mayo es decir el día 12 de la fase experimental se empezó a realizar el monitoreo de las variables de temperatura edáfica, pH y conductividad eléctrica. En este primer día de control, se evidenció que el tratamiento 0 presentaba un olor “normal” mientras que el tratamiento 1 y 2 emanaban un olor fuerte a limón proveniente del biosólido, así mismo, no

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén- Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

se evidenciaron anomalías y se movieron los tubos hacia el oriente con la finalidad de identificar si la ubicación de estos alteraba la temperatura edáfica. Se resalta que para el 14 de junio, es decir el día 27 se giraron los tubos con los orificios hacia arriba nuevamente.

Durante el periodo de tiempo enmarcado en esta bitácora, la temperatura edáfica del control (Tratamiento 0, proporción /dosis suelo: biosólido 1:0) siempre fue superior a la determinada para los tratamientos 1 y 2, siendo el día 21 donde se elevó hasta valores como 17, 93°C (control), 15,80 °C (tratamiento 1) y 16,70°C (tratamiento 2) las cuales fueron las más altas alcanzadas en el primer mes y que puede estar relacionado con la temperatura ambiental y humedad registrada debido a que el valor notificado ese día fue de 21°C y 58% respectivamente que son los valores más altos y bajos identificados para estos parámetros.

En cuanto al pH, para el tratamiento 0 el mínimo valor registrado fue de 6,67 el día 12 mientras que el más elevado fue de 7,53 el día 27; en lo que concierne al tratamiento 1 el valor inferior fue de 5,88 el día 19 en tanto que el mayor valor fue de 7,66 el día 21; por último, el tratamiento 2 experimento el menor pH el día 12 con una magnitud de 7,05, en cambio la magnitud más alta registrada fue de 7,52 el día 29. Finalmente, para la conductividad eléctrica en el tratamiento 0 el valor mínimo fue de 0,0064 dS/m el día 27 y el valor máximo fue de 0,0121 dS/m el día 12; el tratamiento 1 los días 12 y 29 registró su máximo valor que fue de 0,0109 dS/m y el día 19 se identificó su valor mínimo que fue de 0,003 dS/m el cual concuerda con la magnitud más baja alcanzada en el pH; y para el tratamiento 2 el día 12 obtuvo un valor de CE de 0,00898 dS/m siendo este el más alto mientras que el mínimo alcanzado durante este periodo de tiempo fue de 0,00522 dS/m registrado el día 27.

Fuente: Autora, 2023

Tabla 23. Mes 2 (19 de junio de 2023- 19 de julio de 2023)

Mes 2 (19 de junio – 19 de julio de 2023)										
Valores de medición (pH, CE y Temperatura edáfica)										
Fecha	Día	Tratamiento 0			Tratamiento 1			Tratamiento 2		
		pH	CE (dS/m)	Temperatura Edáfica (°C)	pH	CE (dS/m)	Temperatura Edáfica (°C)	pH	CE (dS/m)	Temperatura Edáfica (°C)
28/06/2023	41	7,5	0,0065	19,07	7,88	0,0090	18,00	7,54	0,00637	16,20
30/06/2023	43	7,98	0,0053	18,07	7,95	0,0165	17,53	8,46	0,00537	15,93
4/07/2023	47	8,14	0,0073	15,43	7,61	0,0104	15,27	7,67	0,00786	13,87
6/07/2023	49	7,85	0,0072	19,13	7,73	0,0149	17,50	8,23	0,00593	14,60
14/07/2023	57	5,7	0,0065	18,87	6,21	0,0134	18,63	6,62	0,00676	15,73
Valores de medición, clima ambiental (T°, % humedad)						Imágenes				

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén- Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

Fecha	Día	Temperatura ambiente (°C)	Humedad (%)
28/06/2023	41	19	60
30/06/2023	43	18	67
4/07/2023	47	14	89
6/07/2023	49	16	83
14/07/2023	57	18	73



Descripción

Debido a que en los tubos de PVC se observó la pérdida de agua, el día 28 de junio es decir el día 41 se inició el riego por aspersión haciendo uso de un atomizador plástico, el cual consistió en la aspersión de agua en cada orificio tres veces por tubo.

Se presentó el alza en 2°C aproximadamente de la temperatura edáfica para cada uno de los tratamientos. En el tratamiento 0 el día 47 se registró la temperatura mínima de 15,43°C y el día 49 se presentó la temperatura máxima de 19,13°C; por otro lado, en el tratamiento 1 la temperatura más alta fue de 18,63 °C alcanzada el día 57 mientras que la temperatura inferior fue de 15,27°C registrada el día 47 que concuerda con la identificada para el tratamiento 0. En lo que concierne al tratamiento 2 la temperatura mínima nuevamente concuerda con el día 47 con una magnitud de 13,87°C mientras que la más elevada fue de 15,93°C determinada el día 43. Cabe destacar que los valores de temperatura mínima precisadas para los tratamientos concuerdan con el mínimo de temperatura ambiental distinguida para el periodo de tiempo que fue de 14°C con una humedad elevada de 89%, siendo esta última la más alta identificada hasta lo transcurrido de la fase experimental.

En cuanto al pH, para el tratamiento 0 el mínimo valor registrado fue de 5,7 el día 57 mientras que el más elevado fue de 8,14 el día 47; en lo que concierne al tratamiento 1 el valor inferior fue de 6,21 el día 57 en tanto que el mayor valor fue de 7,95 el día 43; por último, el tratamiento 2 experimento el menor pH el día 57 con una magnitud de 6,62, en cambio la magnitud más alta registrada fue de 8,46 el día 43. Finalmente, para la conductividad eléctrica en el tratamiento 0 el valor mínimo fue de 0,0053 dS/m el día 43 y el valor máximo fue de 0,0073 dS/m el día 47; el tratamiento 1 el día 43 registró su máximo valor que fue de 0,0165 dS/m y el día 41 se identificó su valor mínimo que fue de 0,009 dS/m; y para el tratamiento 2 el día 47 obtuvo un valor de CE de 0,00786 dS/m siendo este el más alto mientras que el mínimo alcanzado durante este periodo de tiempo fue de 0,00537 dS/m registrado el día 43.

Fuente: Autora, 2023

Tabla 24. Mes 3 (19 de julio de 2023- 19 de agosto de 2023)

Mes 3 (19 de julio – 19 de agosto de 2023)										
Valores de medición (pH, CE y Temperatura Edáfica)										
Fecha	Día	Tratamiento 0			Tratamiento 1			Tratamiento 2		
		pH	CE (dS/m)	Temperatura Edáfica (°C)	pH	CE (dS/m)	Temperatura Edáfica (°C)	pH	CE (dS/m)	Temperatura Edáfica (°C)
24/07/2023	67	6,63	0,0057	16,73	6,66	0,0135	16,13	7,2	0,00876	13,70
26/07/2023	69	6,74	0,0100	16,53	7,05	0,0188	16,63	7,36	0,01845	14,67
31/07/2023	74	7,4	0,0118	17,53	7,33	0,0155	17,27	7,13	0,01173	16,03
4/08/2023	78	8,31	0,0232	22,57	8,1	0,0394	21,50	8,1	0,00920	20,97
8/08/2023	82	7,01	0,0113	19,97	6,93	0,0147	20,47	7,13	0,01126	19,13
12/08/2023	86	7,51	0,0093	20,00	7,43	0,0112	20,03	7,665	0,01100	18,17
12/08/2023	86	7,57	0,0081	21,30	7,56	0,0127	21,37	8,05	0,01440	19,53
15/08/2023	89	7,18	0,0079	18,37	7,36	0,0103	18,07	7,96	0,01394	17,87
17/08/2023	91	7,08	0,0098	21,53	7,45	0,0102	20,53	7,34	0,01107	19,37

Valores de medición clima ambiental (T° ambiental, % humedad)				Imágenes
Fecha	Día	Temperatura ambiente (°C)	Humedad (%)	
24/07/2023	67	14	86	
26/07/2023	69	16	83	
31/07/2023	74	18	67	
4/08/2023	78	16	53	
8/08/2023	82	18	51	
12/08/2023	86	16	78	
15/08/2023	89	16	62	
17/08/2023	91	19	52	

Descripción

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén- Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

El 4 de agosto se inició el riego de agua destilada a través del método de aspersión mencionado anteriormente. En este mes, debido a que se estaba dificultando la extracción del suelo: biosólido para realizar el proceso de muestreo por falta de humedad en los tubos de PVC, el 12 de agosto (día 86) se decidió extraer el contenido de cada uno de los tubos y depositarlo en una cubeta para en un principio monitorear los parámetros previo a realizar la aireación y aplicación de la dosis pertinente de agua destilada para que recupere la humedad sin afectar la cantidad de sales disueltas y posteriormente realizar nuevamente la medición de los parámetros, con el objetivo de evidenciar si se presentó alguna variación. Al momento de realizar este proceso, se observó que en los tratamientos 1 y 2 el color del suelo cambió a comparación del tratamiento 0, también se identificó la presencia de ciertos terrones que antes no existían.

En el tratamiento 0 el día 69 se registró la temperatura mínima de 16,53°C y el día 78 se presentó la temperatura máxima de 22,57°C; por otro lado, en el tratamiento 1 la temperatura más alta fue de 21,50 °C alcanzada el día 78 concuerda con la identificada para el tratamiento 0, mientras que la temperatura inferior fue de 16,13°C registrada el día 67. En lo que concierne al tratamiento 2 la temperatura mínima nuevamente concuerda con el día 67 con una magnitud de 13,70°C mientras que la más elevada fue de 20,97°C determinada el día 78 la cual coincide con el día en que los tratamientos 0 y 1 presentaron su mayor temperatura edáfica. Cabe destacar que los valores de temperatura mínima precisadas para los tratamientos 1 y 2 concuerdan con el mínimo de temperatura ambiental distinguida para el periodo de tiempo que fue de 14°C con una humedad elevada de 86%.

En cuanto al pH, para el tratamiento 0 el mínimo valor registrado fue de 6,63 el día 67 mientras que el más elevado fue de 8,31 el día 78; en lo que concierne al tratamiento 1 el valor inferior fue de 6,66 el día 67 en tanto que el mayor valor fue de 7,56 el día 86; por último, el tratamiento 2 experimento el menor pH los días 74 y 82 con una magnitud de 7,13 en cambio la magnitud más alta registrada fue de 8,1 el día 78. Finalmente, para la conductividad eléctrica en el tratamiento 0 el valor mínimo fue de 0,0057 dS/m el día 67 y el valor máximo fue de 0,0232 el día 78; el tratamiento 1 el día 78 registró su máximo valor que fue de 0,0394 dS/m y el día 91 se identificó su valor mínimo que fue de 0,0102 dS/m; y para el tratamiento 2 el día 69 obtuvo un valor de CE de 0,01845 dS/m siendo este el más alto mientras que el mínimo alcanzado durante este periodo de tiempo fue de 0,00876 $\mu\text{S}/\text{cm}$ registrado el día 67.

Fuente: Autora, 2023

Tabla 25. Bitácora Mes 4 (19 de agosto de 2023- 16 de septiembre de 2023)

Mes 4 (19 de julio – 19 de agosto de 2023)
Valores de medición (pH, CE y Temperatura Edáfica)

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén- Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

Fecha	Día	Tratamiento 0			Tratamiento 1			Tratamiento 2		
		pH	CE (dS/m)	Temperatura Edáfica (°C)	pH	CE (dS/m)	Temperatura Edáfica (°C)	pH	CE (dS/m)	Temperatura Edáfica (°C)
22/08/2023	96	6,89	0,0055	17,13	7,07	0,0089	16,70	7,74	0,00684	16,40
29/08/2023	103	7,71	0,0065	21,33	7,27	0,0073	20,40	7,25	0,00699	20,00
31/08/2023	105	6,99	0,0050	19,77	7,26	0,0065	19,67	7,65	0,00464	20,00
5/09/2023	110	7,21	0,0071	19,63	7,45	0,0071	19,60	7,29	0,00733	19,47
7/09/2023	112	6,73	0,0068	18,40	7,26	0,0064	17,97	7,05	0,01490	17,83
12/09/2023	117	7,03	0,0043	21,17	7,6	0,0045	21,27	7,46	0,00375	20,93
14/09/2023	119	6,12	0,0027	17,67	6,22	0,0042	17,33	6,46	0,00347	17,43
16/09/2023	121	6,42	0,0116	18,40	6,60	0,0137	20,60	6,99	0,01007	19,77

Valores de medición clima ambiental (T° ambiental, % humedad)

Fecha	Día	Temperatura ambiente (°C)	Humedad (%)
22/08/2023	96	15	81
29/08/2023	103	18	41
31/08/2023	105	19	42
5/09/2023	110	16	66
7/09/2023	112	16	49
12/09/2023	117	17	52
14/09/2023	119	18	56
16/09/2023	121	21	57

Imágenes



Descripción

El 16 de septiembre se desmanteló el prototipo, no sin antes realizar la medición de los parámetros de pH, conductividad eléctrica y temperatura edáfica a cada una de las réplicas de las dosis aplicadas. Al depositar el contenido de cada uno de los tratamientos sobre una “cubeta” se identificaron claramente las diferencias a nivel físico que existían entre el tratamiento 0 y el tratamiento 1 y 2 debido a que en estos últimos se produjo la formación de terrones los cuales hace 4 meses no estaban, además, el olor a limón característico del biosólido al inicio de la fase experimental desapareció.

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén- Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

En el tratamiento 0 el día 96 se registró la temperatura mínima de 17,13°C y el día 103 se presentó la temperatura máxima de 21,33°C; por otro lado, en el tratamiento 1 la temperatura más alta fue de 21,27 °C alcanzada el día 117 ,mientras que la temperatura inferior fue de 16,70°C registrada el día 96 .En lo que concierne al tratamiento 2 la temperatura mínima nuevamente concuerda con el día 96 con una magnitud de 16,40°C mientras que la más elevada fue de 20,93°C determinada el día 117 la cual coincide con el día en que el tratamiento 1 presentó su mayor temperatura edáfica. Cabe destacar que los valores de temperatura mínima precisadas para los tratamientos 1 y 2 concuerdan con el mínimo de temperatura ambiental distinguida para el periodo de tiempo que fue de 15°C con una humedad elevada de 81%.

En cuanto al pH, para el tratamiento 0 el mínimo valor registrado fue de 6,12 el día 119 mientras que el más elevado fue de 7,71 el día 103; en lo que concierne al tratamiento 1 el valor inferior fue de 6,22 el día 119 en tanto que el mayor valor fue de 7,6 el día 117; por último, el tratamiento 2 experimento el menor pH el día 119 con una magnitud de 6,22 en cambio la magnitud más alta registrada fue de 7,45 el día 110. Finalmente, para la conductividad eléctrica en el tratamiento 0 el valor mínimo fue de 0,0027 dS/m el día 119 y el valor máximo fue de 0,0116 el día 121; el tratamiento 1 el día 121 registró su máximo valor que fue de 0,0137 dS/m y el día 119 se identificó su valor mínimo que fue de 0,0042 dS/m ; y para el tratamiento 2 el día 112 obtuvo un valor de CE de 0,01490 dS/m siendo este el más alto mientras que el mínimo alcanzado durante este periodo de tiempo fue de 0,00347 μ s/cm registrado el día 119.

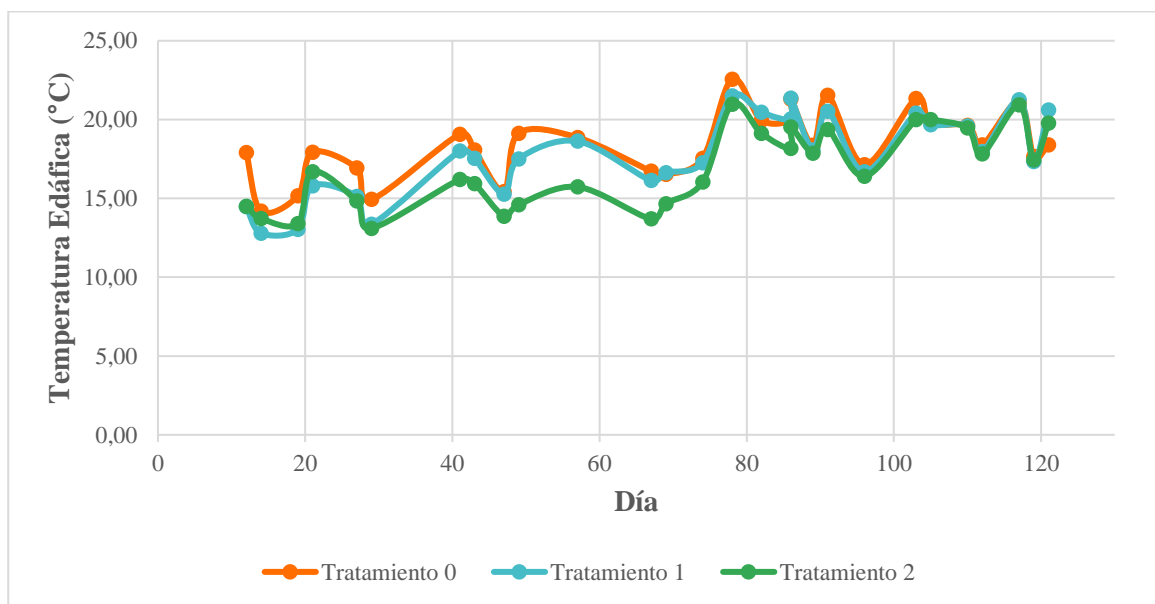
Fuente: Autora, 2023

7.2.3. Monitoreo y seguimiento. Análisis y discusión

La temperatura diagnosticada para el suelo objeto de estudio en esta investigación fue superior a los 22°C, específicamente con valores de 24,5°C, 24,6°C y 30,8°C en cada uno de los puntos de muestreo como se observa en la Figura 30, no obstante, una vez se instaló el prototipo con las diferentes dosis de suelo: biosólido la temperatura edáfica disminuyó hasta los 17°C (tratamiento 0) y en el rango de 14,3 a 14,8°C en los tratamientos 1 y 2, pasando de un régimen de temperatura Hipertérmico e Isohipertérmico a Mésico e Isomésico (Jaramillo J., 2002).

A medida que transcurrían los días, como se observa en la Figura 32 se evidencia que la temperatura superior es la del tratamiento 0 hasta el día 41, debido a que en los otros tratamientos posiblemente estaba ocurriendo un proceso de estabilización o como lo menciona Soriano-Disla et al., (2010), un proceso de degradación de COS nativo para luego si iniciar con el carbono adicionado a través de los biosólidos que según Pitombo et al., (2015) entre mayor cantidad de materia orgánica disponible, mayor serán los efectos sobre la temperatura de la mineralización de esta, por lo tanto, la temperatura no incrementaba porque no había comenzado la actividad microbiana, mientras que a medida que se presentó la fase de crecimiento de los microorganismos se generó calor aumentando la temperatura edáfica de los tratamientos 1 y 2 (día 78) superando así la del tratamiento 0 (Bueno Márquez et al., 2010)

Figura 32. Temperatura Edáfica, Tratamientos



Fuente: Autora, 2023

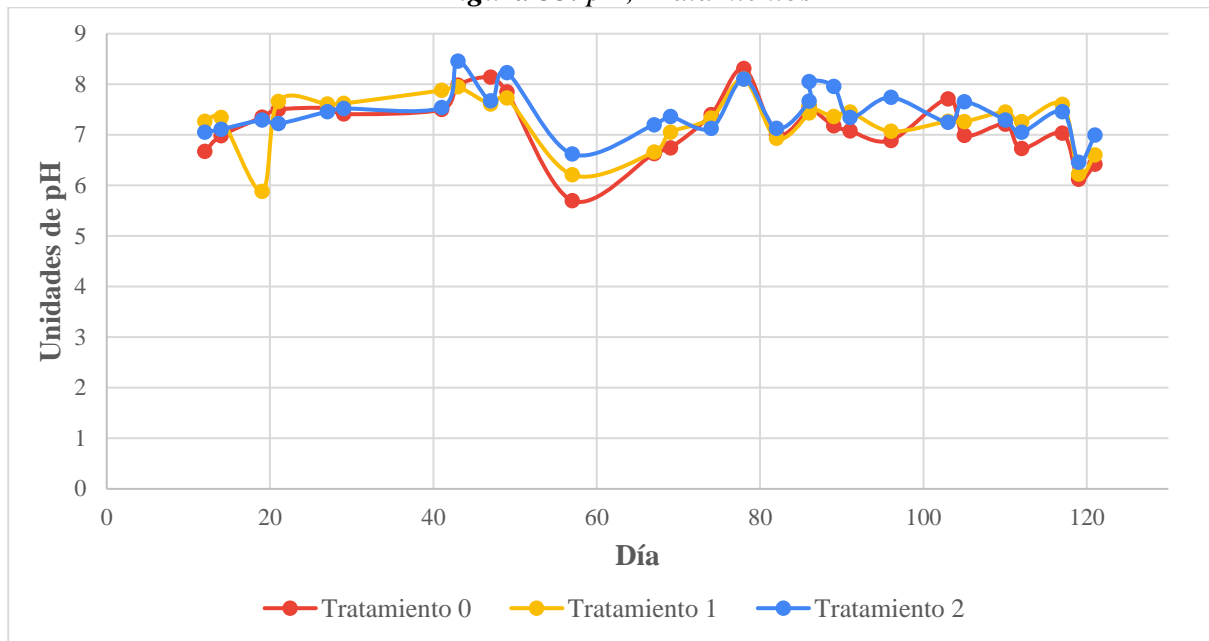
Por otro lado, el comportamiento de la gráfica es de carácter variable en cuanto no se observa una temperatura constante durante los 4 meses, de igual manera, para el tratamiento 0 se presentó un incremento de temperatura promedio de 3°C, en el tratamiento 1 se elevó 5,09°C, mientras que en el tratamiento 2 aumentó 4,88°C.

En cuanto al pH, según lo observado en la Figura 33 se produjo un aumento y disminución de los valores de este parámetro concordando con lo hallado por Neilsen et al., (1998), quien durante el desarrollo de su artículo encontró incrementos y decrecimientos en el pH de los tratamientos, los cuales pueden estar correlacionados con el contenido de carbonato de calcio del biosólido o la producción de ácidos durante la degradación de este (Delibacak et al., 2020). Pese a que el comportamiento del pH fue variable durante la fase experimental se mantuvo en el rango de 5,8 a

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

8,14 con un promedio de 7,21 para el tratamiento 0, 7,28 para el tratamiento 1 y 7,44 en el tratamiento 2; siendo este un pH neutro a ligeramente alcalino (IGAC, 2021).

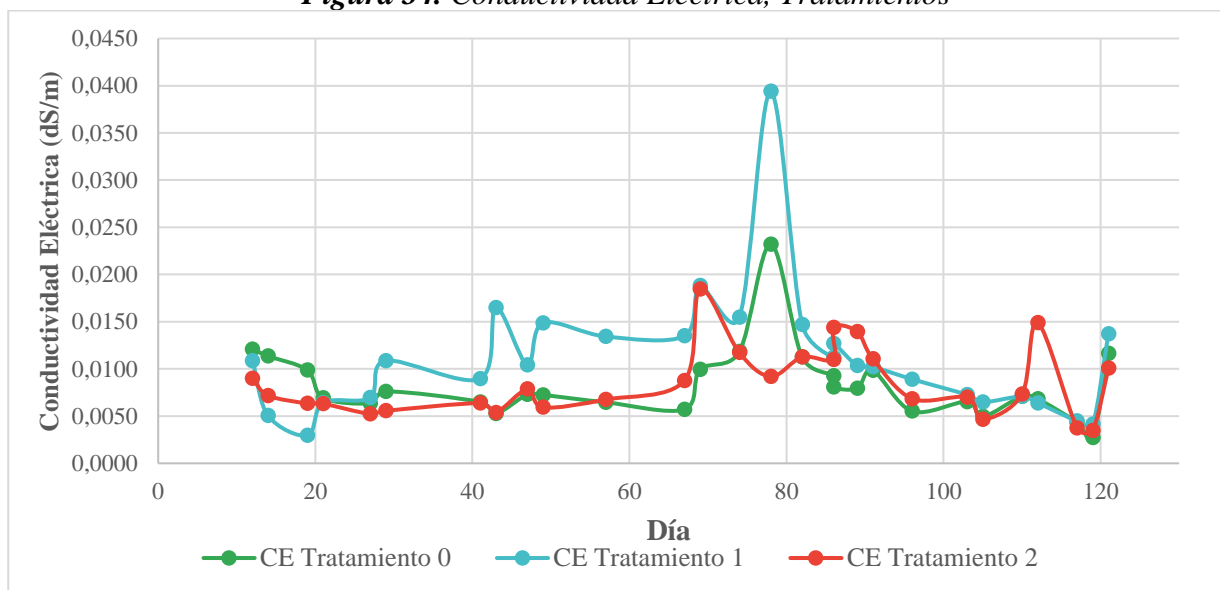
Figura 33. pH, Tratamientos



Fuente: Autora, 2023

Finalmente la conductividad eléctrica como se observa en la Figura 34 aumentó de manera acelerada y desenfrenada, debido a que siempre varió alcanzando valores muy elevados o en algunos casos muy bajos a comparación de los obtenidos en otros días. Este incremento se respalda con lo estipulado en el manual de la FAO de prácticas para la recarbonización de suelos del mundo en cuanto afirman que la adición de biosólidos genera un incremento en la conductividad eléctrica, de igual manera, Fernández et al., (2009); González-Ubierna et al., (2013) y Guacaname & Barrera, (2007) durante el desarrollo de sus artículos también presentaron un alto incremento de este parámetro con valores de hasta 4,87 dS/m pero específicamente con una alta dosis de biosólido (FAO, 2021).

Figura 34. Conductividad Eléctrica, Tratamientos



Fuente: Autora, 2023

Cabe destacar que si bien no se evidenció un alto incremento en los valores de salinidad del suelo, el biosólido cumple con las expectativas de aumentar la magnitud de este parámetro porque como se observa en la Tabla 20 cuenta con altos niveles de concentración de sales disueltas para aportar al suelo degradado.

7.3. Objetivo específico N°3. Comparar la eficiencia de las dosis del tratamiento de biosólidos sobre los procesos de recarbonización y recuperación de algunos indicadores de calidad del suelo como alternativa sostenible.

A continuación se presentan los resultados, análisis y discusión del tercer objetivo que se enfocó en comparar los resultados de los parámetros físicos y químicos obtenidos al inicio y final del tratamiento de biosólidos, para posteriormente identificar la correlación que existe entre cada uno de los indicadores de calidad y salud del suelo con el carbono orgánico del suelo específicamente haciendo uso del coeficiente de correlación de Pearson. Finalmente se implementó la prueba T-Student para validar o rechazar las hipótesis planteadas en la presente investigación.

7.3.1. Relación dosis suelo: biosólido e indicadores físicos y químicos de calidad y salud del suelo

Los resultados obtenidos del procesamiento de las muestras de suelo antes y después del tratamiento de biosólidos permitieron realizar un análisis comparativo instaurado en la Tabla 26, producto del procesamiento del Anexo III cuyo análisis se hizo en el mes de septiembre del año en curso en el Laboratorio Nacional de Suelos del IGAC, como consecuencia del desarrollo de las pruebas de laboratorio en las instalaciones de la Universidad El Bosque y los respectivos cálculos de las propiedades físicas manifestadas en la sección de Metodología.

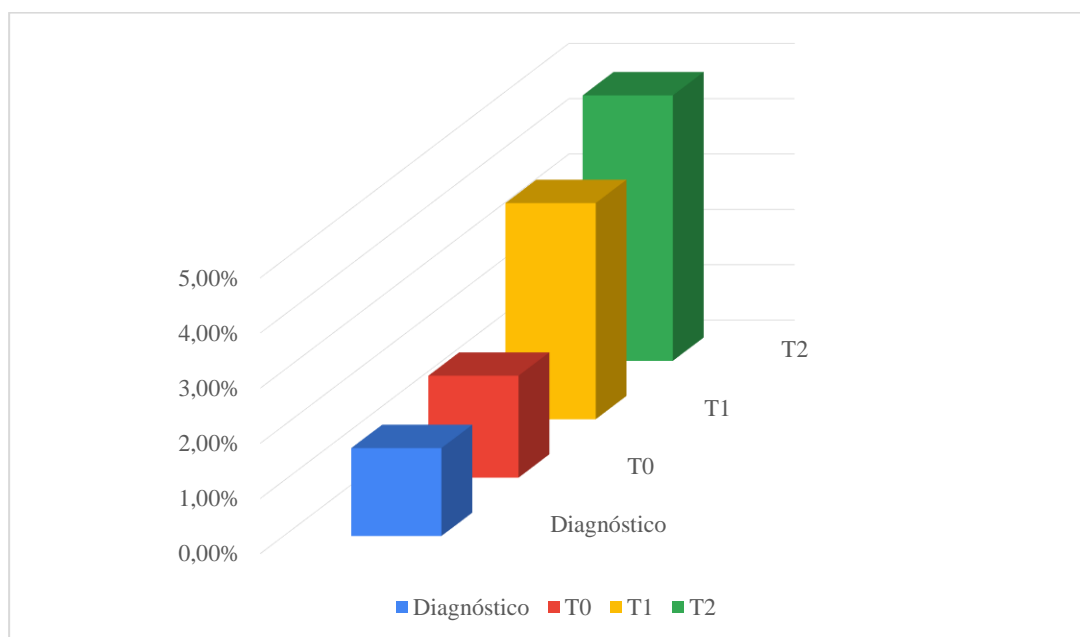
Tabla 26. Comparación de los resultados obtenidos, parámetros físicos y químicos

Parámetro	Diagnóstico	Tratamiento 0	Tratamiento 1	Tratamiento 2
pH	7,31	6,75	6,84	6,93
Carbono orgánico	1,59%	1,84%	3,91%	4,79%
Materia Orgánica	2,75%	3,19%	6,75%	8,27%
Relación C/N	11,39	11,55	11,51	11,70
Fósforo disponible	45,09 ppm	62,07 ppm	11,61 ppm	11,76 ppm
Capacidad de Intercambio Catiónico	12,15 meq/100	16,59 meq/100	19,02 meq/100	21,75 meq/100
Nitrógeno Calculado	0,14%	0,16%	0,34%	0,41%
Conductividad eléctrica	0,0075 dS/m	0,012 dS/m	0,017 dS/m	0,022 dS/m
Densidad aparente	0,30 g/cm ³	0,48 g/cm ³	1,40 g/cm ³	0,97 g/cm ³
Densidad real	1,61 g/cm ³	1,60 g/cm ³	2,23 g/cm ³	1,80 g/cm ³
Diámetro ponderado medio	0,027mm	0,004 mm	0,004 mm	0,016 mm
Estado de agregación	41,07	48,32	98,69	95,81
Porosidad	81,27%	70%	37,40%	46,06%
Humedad gravimétrica	7,05%	17,06%	16,10%	26,76%

Fuente: Autora, 2023

En el cual se observó un incremento en el carbono orgánico del suelo (COS) cuyos porcentajes se muestran en la Figura 35, así mismo, según la Tabla 10 se mantuvo en una clasificación baja para el tratamiento 0 y 1 pero paso de baja (1,59%) a media (4,79%) para el tratamiento 2, resultando coherente con artículos como el de Börjesson & Kätterer, (2018); Fernández et al., (2009); Guacaname & Barrera, (2007); Kalisz et al., (2017); Pitombo et al., (2015) quienes reportaron el aumento de la concentración de carbono orgánico al realizar la aplicación de una mayor dosis de biosólido, no obstante, obtuvieron mejores resultados debido al tiempo de implementación del tratamiento que en promedio fue de 11 años y de la cantidad aplicada, puesto que eran magnitudes oscilantes entre 5 a 90 Ton/ha de suelo.

Figura 35. Porcentaje de aumento carbono orgánico del suelo (COS)



Fuente: Autora, 2023

Ante esto, se confirma que las dosis aplicadas del tratamiento de biosólidos cumplen con una de las principales prioridades de la herramienta RECSOIL (Recarbonización de los suelos del mundo), en cuanto es una práctica de manejo sustentable del recurso suelo que aumenta las reservas del carbono orgánico (COS) y contribuye a alcanzar la meta 12.5 del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 12 “Consumo y producción sostenible”, reducir sustancialmente la generación de residuos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización, porque se está integrando los biosólidos, un residuo catalogado como peligroso al recurso suelo como práctica de gestión sostenible, fomentando la economía circular (FAO, 2020; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

Por otro lado, también cumple con las meta 13.2. Integrar medidas de cambio climático y 15.3. Detener la desertificación y restaurar las tierras degradadas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 13 “Acción por el clima” y 15 “Vida de ecosistemas terrestres”, respectivamente; debido que al recarbonizar el suelo, directamente se están mejorando los parámetros físicos y químicos de calidad y salud del suelo como se observa en la Tabla 26, es decir se está recuperando el suelo degradado (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016, 2022). Esto se demostró a través del coeficiente de correlación de Pearson que mide la fuerza de relación lineal entre los valores cuantitativos apareados, que para la presente investigación es la relación entre los

indicadores físicos y químicos de calidad del suelo con el carbono orgánico del suelo (COS), cuyos valores obtenidos se muestran en la Tabla 27 (Triola, 2009).

Tabla 27. Coeficiente de Pearson

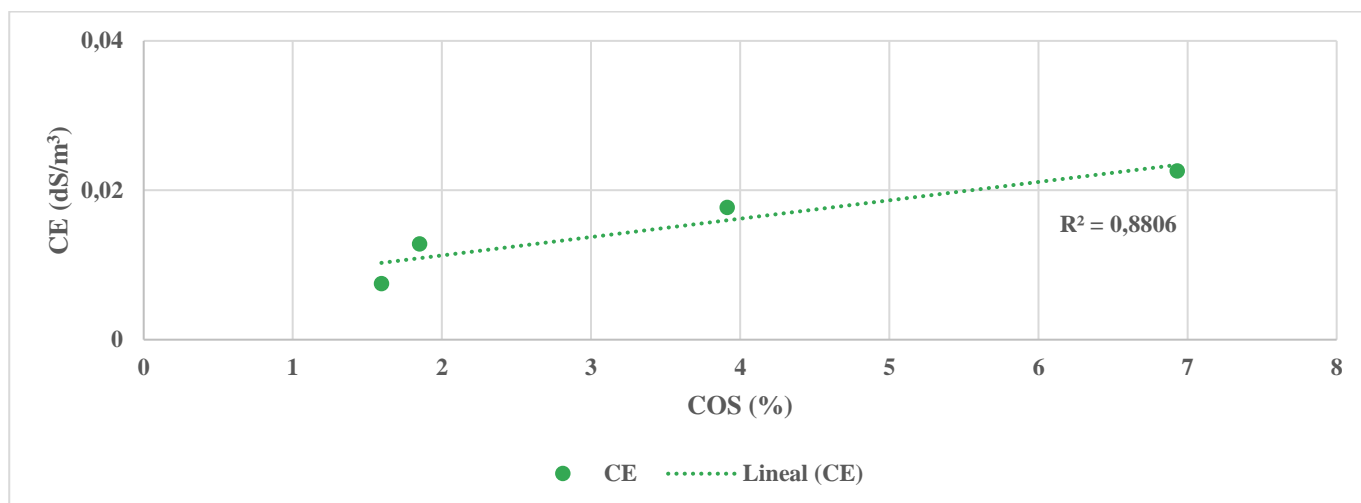
Parámetro	Coeficiente de Pearson
pH	-0,259
Materia Orgánica	0,558
Relación C/N	0,852
Fósforo disponible	-0,816
Capacidad de Intercambio Catiónico	0,893
Nitrógeno Total	0,953
Conductividad Eléctrica	0,938
Densidad aparente	0,629
Densidad real	0,397
Estabilidad de agregados	0,846
Porosidad	-0,753
Humedad gravimétrica	0,872

Fuente: Autora, 2023

Los parámetros químicos que presentaron mayor correlación con el carbono orgánico del suelo, es decir cuyo valor de r se acerca a 1 fueron relación C/N, CIC, N y CE (Triola, 2009). En primer lugar, la **conductividad eléctrica** aumentó pasando de $0,0075 \text{ dS/m}^3$ a $0,012 \text{ dS/m}^3$, $0,017 \text{ dS/m}^3$ y $0,022 \text{ dS/m}^3$, para el tratamiento control (T0) y con las dosis aplicadas en el tratamiento 1 y 2 respectivamente, siguiendo el comportamiento hallado para este parámetro por Fernández et al., (2009); González-Ubierna et al., (2013); Guacaname & Barrera, (2007), donde este último obtuvo un incremento de salinidad de $0,5 \text{ dS/m}^3$ en el suelo al que se le suministró la mayor dosis aplicada debido a la presencia de sales solubles en los biosólidos o por la mineralización de la materia orgánica presente.

Así mismo, atribuye este comportamiento a la adición de químicos utilizados para la estabilización del sustrato, no obstante, es posible que no haya aumentado significativamente y según la Tabla 16 se haya mantenido en el rango de no salino por el riego realizado, en cuanto pudo haberse lavado las sales acumuladas (Potisek Talavera et al., 2010). Para este parámetro el coeficiente de correlación fue de $r=0,93$ mostrando una correlación fuerte lineal, excelente y positiva que permite afirmar una relación directa con el COS, debido que al momento es que este aumenta la conductividad eléctrica también lo hará, como se presenta en la siguiente figura (Martínez Bencardino, 2019; Triola, 2009).

Figura 36. Coeficiente de Correlación de Pearson, Conductividad Eléctrica

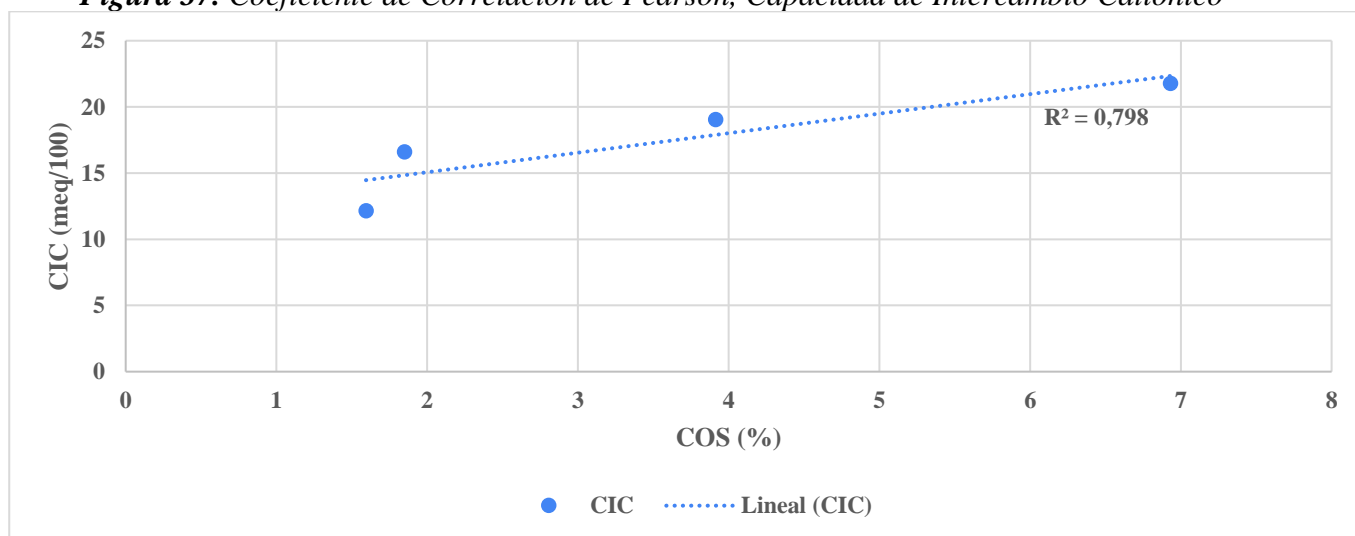


Fuente: Autora, 2023

Por otro lado, la **capacidad de intercambio catiónico** se mantuvo en un valor medio para el tratamiento 0 y 1 con valores de 16,591 meq/100 y 19,027 meq/100 respectivamente, pero se elevó a un rango alto según la Tabla 11 en los tratamiento 1 y 2, donde en este último alcanzó una magnitud de 21,755 meq/100. Este comportamiento corresponde a uno de los beneficios de la materia orgánica (Tabla 17) y se respalda con lo obtenido por Guacaname & Barrera, (2007) quienes también presenciaron el aumento proporcional y significativo con respecto a la dosis de aplicación del biosólido con incremento de 0,95 meq/100 a 4 meq/100, así mismo, se infiere que se mejoró la habilidad del suelo para retener cationes y nutrientes en cuanto se aumentó el contenido de materia orgánica y carbono orgánico (FAO, 2023).

Para este parámetro el coeficiente de correlación fue de $r=0,89$ mostrando una correlación aceptable y positiva que permite afirmar una relación directa con el COS, debido que al momento es que este aumenta la capacidad de intercambio catiónico también lo hará, como se presenta en la Figura 37 (Martínez Bencardino, 2019; Triola, 2009).

Figura 37. Coeficiente de Correlación de Pearson, Capacidad de Intercambio Catiónico

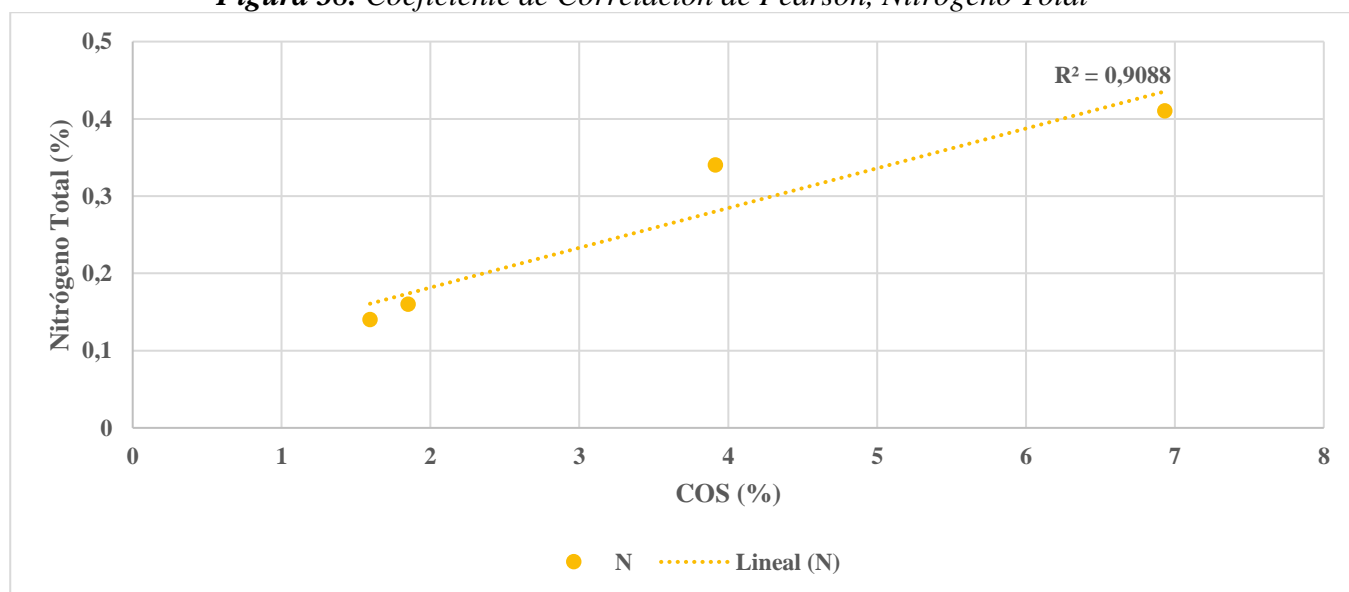


Fuente: Autora, 2023

Además, el **pH** disminuyó pasando de 7,31 a valores como 6,750 (T0), 6,840 (T1) y 6,930 (T2) como lo reportan González-Ubierna et al., (2013) quien obtuvo una disminución de 1,3 unidades de pH y Neilsen et al., (1998) ; de manera que según la Tabla 8 continúan siendo valores neutros, además, se puede inferir que este fenómeno se presentó por la disminución de producción de ácidos durante la degradación del biosólido que concuerda con lo establecido en la Tabla 17 , donde se afirma que la adición de materia orgánica disminuye el pH. No obstante, es posible que si se haya presentado una producción de ácidos pero aumentó la capacidad buffer del suelo, demostrando que ahora el recurso puede absorber estos ácidos sin fomentar cambios significativos en el pH (Jaramillo J., 2002). Es importante mencionar que el coeficiente de correlación fue negativo con magnitud de -0,259 cercano a 0 dando a entender que entre el COS y el pH no existe una correlación lineal (Triola, 2009).

El porcentaje de **nitrógeno total** se triplicó con la mayor dosis de biosólidos (T2) demostrando lo establecido por Guacaname & Barrera, (2007) afirmando que la magnitud del parámetro aumentó de 0,003% a 0,15% proporcionalmente con respecto a la cantidad de sustrato aplicado, pasando de un nivel bajo a uno medio, posiblemente por la tasa de mineralización de este elemento favorecida por el pH neutro o por el contenido de nitrógeno presente en el biosólido que como se observa en la Tabla 20 es de 0,133%; así mismo, presenta un coeficiente de correlación de Pearson de 0,953 (Figura 38) el cual se asemeja al hallado por Soriano-Disla et al., (2010) que registra un valor de 0,911 confirmando que el nitrógeno total y el COS presentan una correlación lineal fuerte y excelente (Fernández et al., 2009; Martínez Bencardino, 2019; Potisek Talavera et al., 2010; Triola, 2009).

Figura 38. Coeficiente de Correlación de Pearson, Nitrógeno Total

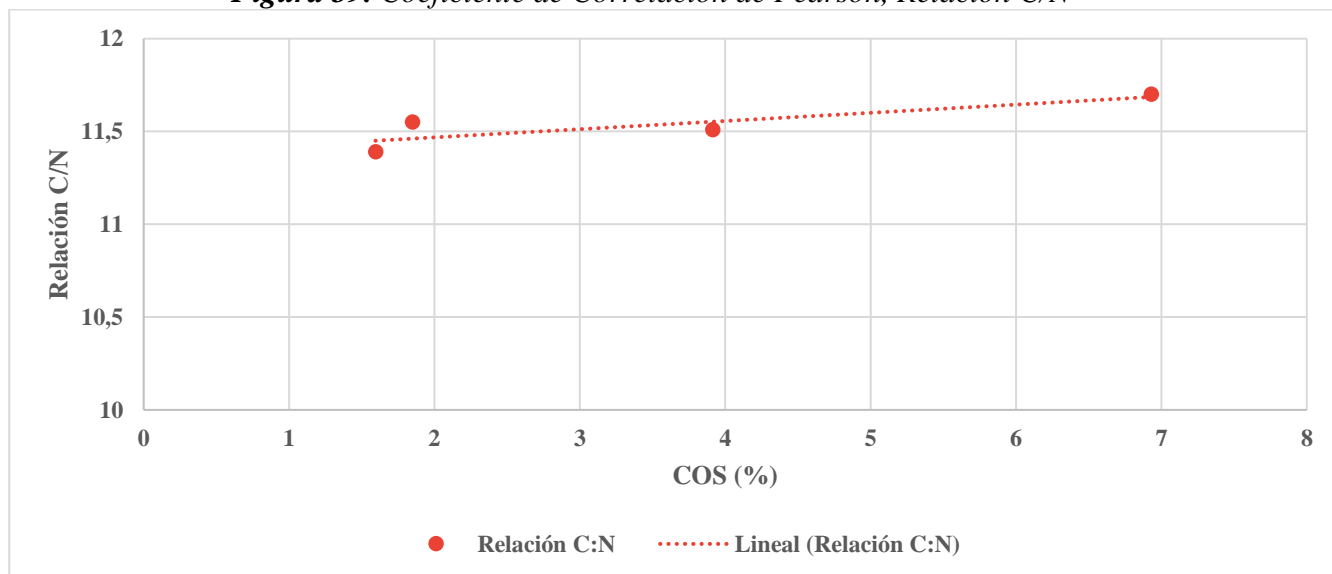


Fuente: Autora, 2023

Cabe destacar que la relación **C/N** no presentó cambios significativos como consecuencia de la aplicación de biosólidos obteniendo valores de 11,55 (T0), 11,51 (T1) y 11,70 (T2) sino que lo mantuvo en un rango ideal, indicando que continua dentro del rango de valores entre 10 y 14 correspondiente a la estabilización de la materia orgánica, su mineralización y ruptura de tejidos rápida puesto que la actividad microbiana se estimula y hay nutrientes suficiente para los microorganismos (Porta et al., 2014). No obstante, a pesar de que el incremento fue limitado, este indicador de calidad y salud del suelo presentó un coeficiente de correlación de 0,852 que al igual

de los anteriores parámetros indica una correlación lineal pero aceptable como se evidencia en la Figura 39 (Martínez Bencardino, 2019; Triola, 2009).

Figura 39. Coeficiente de Correlación de Pearson, Relación C/N



Fuente: Autora, 2023

Respecto al parámetro de **materia orgánica** se evidenció un incremento del 5,52% con el tratamiento 2 mientras que con el tratamiento 1 y 0 se elevó 4% y 0,44% en el orden dado, pasando de un nivel bajo de materia orgánica a uno medio con la dosis aplicadas en los tratamientos 1 y 2. Este comportamiento se respalda con lo obtenido por Potisek Talavera et al., (2010) y Ozores-Hampton et al., (2005) quienes obtuvieron aumentos de hasta 2,8% para este indicador al aplicar la mayor dosis de biosólidos; no obstante, es posible que durante la fase experimental se hayan incrementado más los valores y disminuyeran con el paso del tiempo a causa del fenómeno de lixiviación, lo cual explicaría los bajos niveles de nitrógeno debido a que la materia orgánica disuelta pudo haberlo movido consigo (Potisek Talavera et al., 2010).

Finalmente en cuanto a las propiedades químicas, como se evidencia en la Tabla 27 el coeficiente de correlación de Pearson para el **fósforo disponible** frente al COS es negativo (-0,816) pero muy cercano a -1, demostrando que poseen una fuerte correlación lineal negativa, es decir, que su relación es inversa, a medida que el porcentaje de COS aumenta la concentración de fósforo disminuye (Mendenhall et al., 2010). Así mismo, no se obtuvieron resultados similares a los reportados por autores como Börjesson & Kätterer, (2018); Fernández et al., (2009); Guacaname & Barrera, (2007) y Potisek Talavera et al., (2010) quienes registraron incremento en los valores. alcanzando en promedio los 200 ppm, mientras que en la presente investigación disminuyó para los tratamientos 1 y 2 con magnitudes de 11,61 ppm y 11,76 ppm respectivamente, pasando de un nivel alto a uno bajo según lo reportado en la Tabla 9.

Ante esto, se puede inferir que al no haber restos vegetales y animales que son considerados la principal fuente del fósforo orgánico disponible, no se presentó la liberación de fosfato por parte de los microorganismos presentes en el suelo, además pudo haberse llegado a presentar lixiviación de este elemento al igual que con el nitrógeno total; por otro lado, este comportamiento puede estar relacionado con el proceso de fijación en cuanto se mineralizó el fósforo y está pasando a una fracción no lábil, siendo retenido, fijado o adsorbido en el suelo sin posibilidad de diagnosticarlo a través de la técnica aplicada (Echeverri, 2018; Potisek Talavera et al., 2010).

Por lo que se refiere a las propiedades físicas se obtuvo un coeficiente de correlación menor a comparación de las propiedades químicas, con valores de 0,397 para densidad real, 0,629 para densidad aparente y -0,753 para la porosidad, dando a entender que la densidad real no presenta correlación lineal porque r es cercano a 0, mientras que la densidad aparente posee una correlación regular y la porosidad presenta una fuerte correlación lineal negativa como el caso presentado con el fósforo (Martínez Bencardino, 2019; Mendenhall et al., 2010).

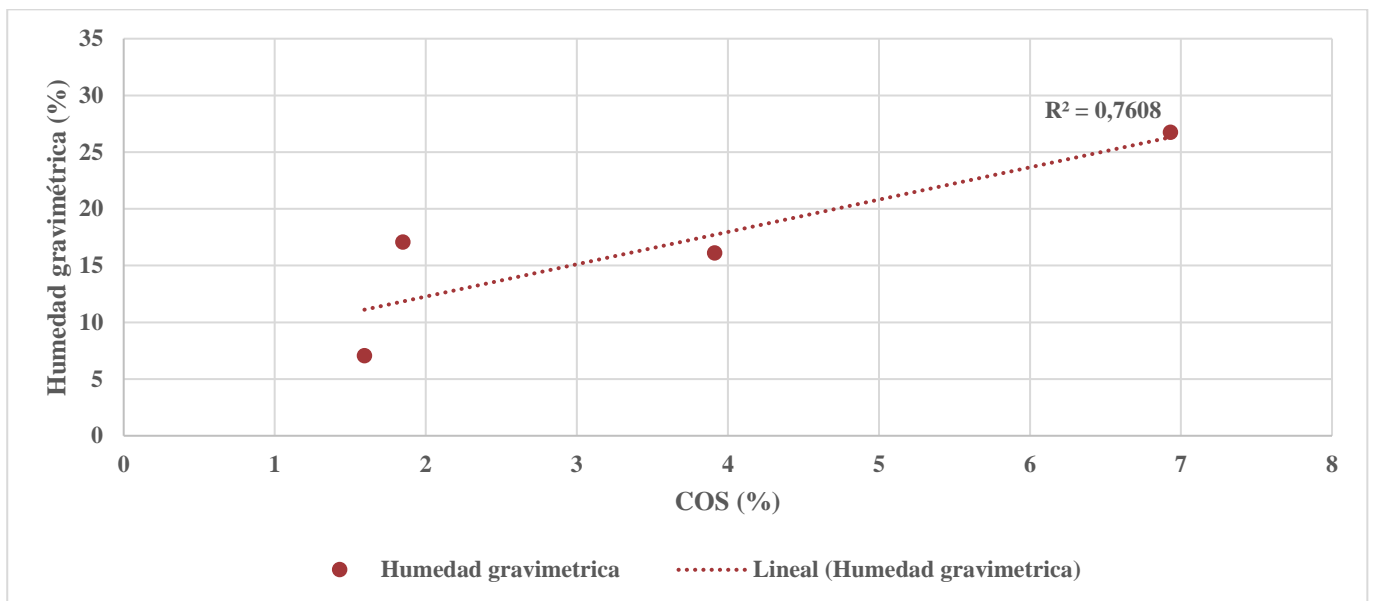
Si bien para la **densidad real** en la literatura no se reporta los efectos generados por la aplicación de biosólidos sobre este parámetro, se afirma que se mantuvo para el tratamiento 0 con un valor de $1,61 \text{ g/cm}^3$ pero incrementó su magnitud a $2,23 \text{ g/cm}^3$ para el tratamiento 1 y a $1,80 \text{ g/cm}^3$ en el tratamiento 2, acercándose al valor promedio ideal establecido por Jaramillo J., (2002) que es de $2,65 \text{ g/cm}^3$. No obstante, se infiere que el aumento en este parámetro se ve influenciado por el aumento del contenido de materia orgánica y carbono orgánico (igual o superior al 5%) y por poseer un contenido de arcilla inferior al 18%, debido a que de acuerdo con Pulido et al., (2014) el suelo al poseer estas características la densidad real presenta cifras que oscilan entre $1,8$ y $2,2 \text{ g/cm}^3$ como las obtenidas en la presente investigación.

Ahora bien, la **densidad aparente y porosidad** para el tratamiento 0 se mantuvo con una magnitud de $0,48 \text{ g/cm}^3$ pero en los demás tratamiento se presentó un comportamiento contrario respecto a lo reportado por Börjesson & Kätterer, (2018) que presentó la disminución de la densidad aparente pasando de valores como $1,59 \text{ g/cm}^3$ a $1,56 \text{ g/cm}^3$; Pitombo et al., (2015) quien también evidenció el descenso de este parámetro con variaciones de densidad aparente de $1,17$ a $1,07 \text{ g/cm}^3$ al realizar la aplicación de una mayor dosis de biosólidos y por Guacaname & Barrera, (2007) quienes reportaron la reducción de la densidad aparente pasando de $1,60$ a $1,20 \text{ g/cm}^3$ e inversamente el aumento de la porosidad de 35% a 50%; dicho esto, se afirma que es contrario porque en la presente investigación la densidad aparente aumentó variando desde $0,30 \text{ g/cm}^3$ a $1,40 \text{ g/cm}^3$ (T1) y $0,97 \text{ g/cm}^3$ (T2); y la porosidad disminuyó pasando de 81,27% a 37,40% (T1) y 46,06 % (T2).

Este evento refleja un proceso de cementación del suelo que en sus efectos físicos es muy similar a la compactación, se diferencia de ésta en que la pérdida de espacio poroso en la cementación se debe a la unión de partículas mediante sustancias químicas para este caso la materia orgánica, que se ubican a su alrededor y llegan a formar una fase casi continua con los sólidos del suelo (Jaramillo J., 2002). Cabe destacar que este fenómeno en este contexto no es perjudicial debido a que a medida que se cementa aumenta el porcentaje de humedad como se registró, donde se inició con una **humedad gravimétrica** de 7,06% y alcanzó valores de 17,06 % (T0) por el riego realizado durante los 4 meses , 16,1% (T1) y 26,76% (T2) donde en estos últimos se debe probablemente a que el proceso disminuyó el tamaño natural de los poros, mejorando la capacidad de almacenamiento de agua por parte del suelo, reduciendo el drenaje y la aireación excesiva, en el que esto último se evidencia en la disminución de la porosidad, alcanzando un porcentaje de 46,06% con la mayor dosis de biosólido que de acuerdo a Jaramillo J., (2002) se acepta como buena porque está alrededor de 50% (Jaramillo J., 2002).

Por consiguiente, para la presente investigación se afirma que la humedad gravimétrica depende del aumento o disminución del COS en cuanto al aumentar esta última, de manera directa se eleva el porcentaje de humedad (Figura 40). Esto se logró comprobar a través del coeficiente de correlación de Pearson, obteniendo un valor de 0,872 siendo este el mayor entre las propiedades físicas e indicando una fuerte correlación lineal aceptable (Martínez Bencardino, 2019).

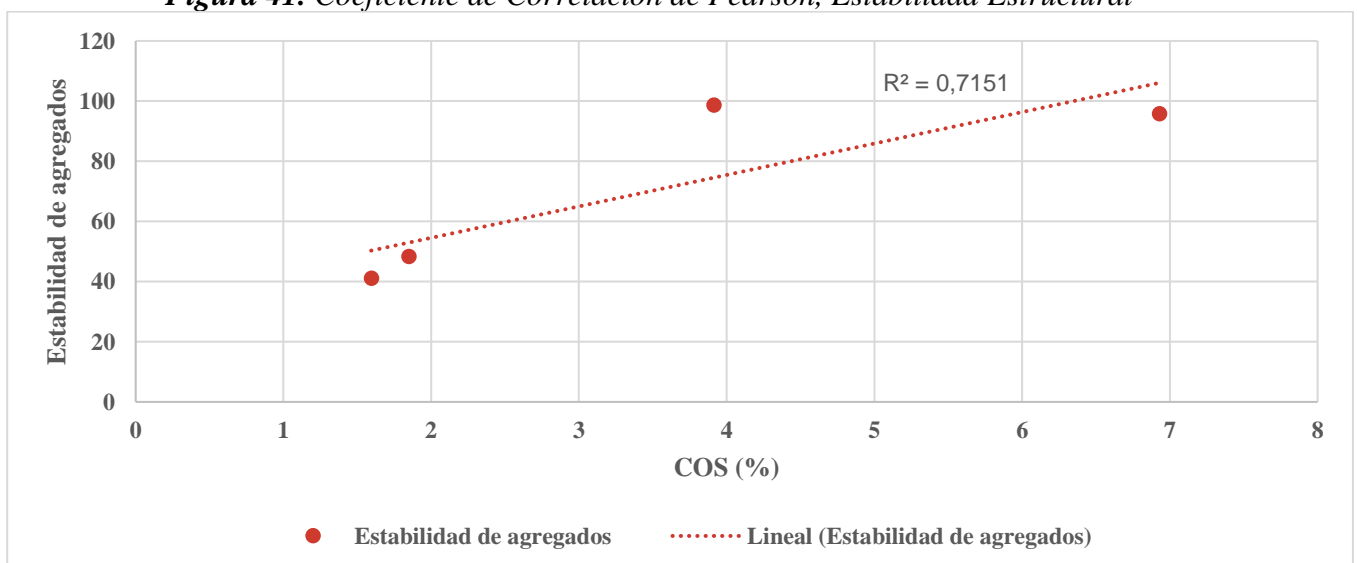
Figura 40. Coeficiente de Correlación de Pearson, Humedad gravimétrica



Fuente: Autora, 2023

Como último beneficio del aumento en el contenido de materia orgánica y carbono orgánico del suelo es la formación de la estructura y aumento del tamaño, y **estabilidad de agregados** (Jaramillo J., 2002). Esta propiedad presentó un mayor coeficiente de correlación con una magnitud de 0,846 indicando una correlación aceptable entre este parámetro y el COS (Figura 41) a pesar de haber mantenido una diámetro ponderado medio inestable para las dos dosis de biosólido aplicadas, no obstante, el estado de agregación varió de media a muy alta según la Tabla 7 pasando de valores como 41,07 (diagnóstico) y 48,32 (T0) a 98,69 (T1) y 95,81 (T2) (Martínez Bencardino, 2019; Mendenhall et al., 2010).

Figura 41. Coeficiente de Correlación de Pearson, Estabilidad Estructural



Fuente: Autora, 2023

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

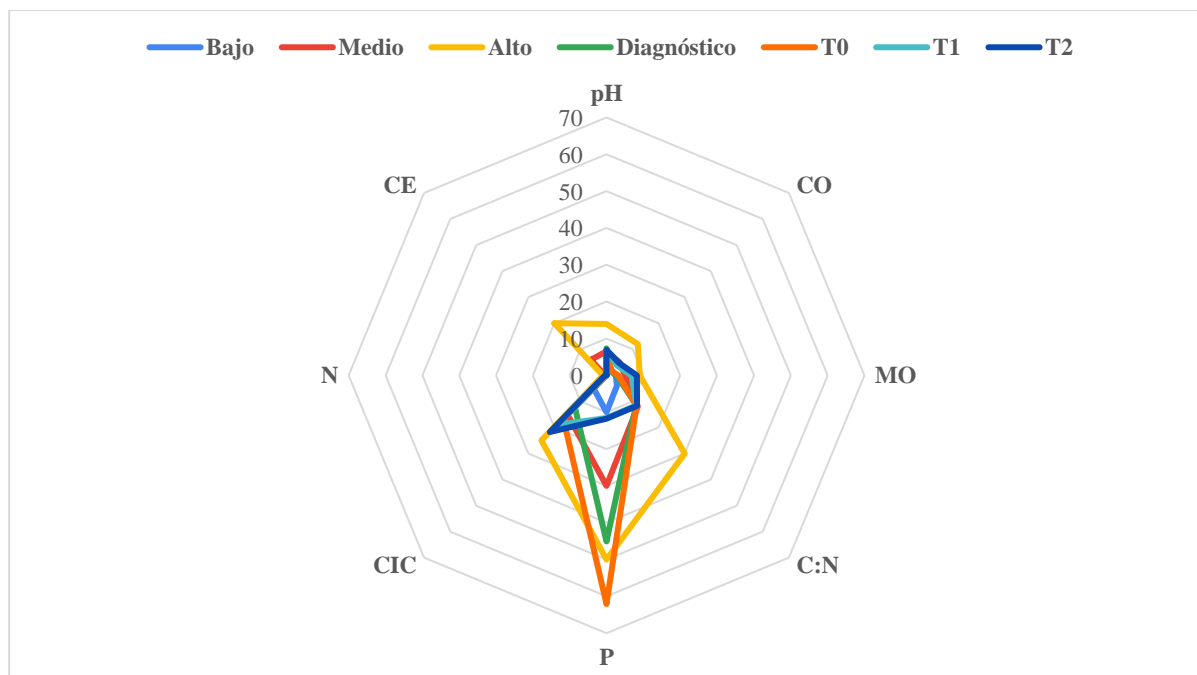
Así mismo, se presentó el mismo comportamiento al obtenido por Peñarete M et al., (2020) pero no en iguales magnitudes, quién obtuvo el incremento del diámetro ponderado medio cambiando de 2,65mm a valores como 3,25mm , 3,12 mm y 2,93mm afirmando que a mayor dosis de biosólidos se aporta más materia orgánica y carbono orgánico considerados como la base de la estructura del suelo, el alimento para los macro y microorganismos que contribuyen a la formación de agregados y a la resiliencia de suelo para mantener su nivel y estado de agregación cuando se aplican fuerzas externas, ya sea de origen natural o antrópicas (Olivera Sánchez & Avellaneda Torres, 2018).

Por consiguiente, a través de la generación de gráficos radiales (Figura 42 y Figura 43) se afirma que la adición de biosólidos fomenta la recarbonización de los suelos y a su vez recupera la mayoría de los indicadores físicos y químicos de calidad del suelo afectados por la degradación, en cuanto se pasó de niveles bajos y altos según el parámetro evaluado a niveles ideales que permiten restaurar los servicios ecosistémicos del recurso suelo, principalmente ser un sumidero y secuestrador de carbono con el fin de mitigar sus emisiones y ser una medida de lucha contra el cambio climático (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

La Figura 42 se construyó a partir de los “límites” alto, medio y bajo del rango de valores para cada uno de los indicadores químicos de calidad del suelo instaurados por el IGAC y que se pueden observar de la Tabla 8 a la Tabla 11. Inicialmente, una vez establecidos los rangos, se graficó los resultados obtenidos en el diagnóstico inicial con el objetivo de identificar cuales parámetros superaban el límite superior o según el caso eran demasiado bajos, para este caso, el color que simboliza estos valores es el verde como se evidencia en la Figura 42.

Una vez desarrollada la fase experimental se adquirieron los valores de los indicadores químicos para el tratamiento 0 (dosis/ proporción 1:0) identificado en la gráfica con el color naranja, tratamiento 1 (dosis/ proporción 2:1) simbolizado con el color azul celeste y tratamiento 2 (dosis/ proporción 4:1) representado con el color azul oscuro, los cuales permitieron analizar la variación de los datos y ajuste de cada uno de ellos dentro de los rangos planteados por el IGAC.

Figura 42. Recuperación de propiedades químicas

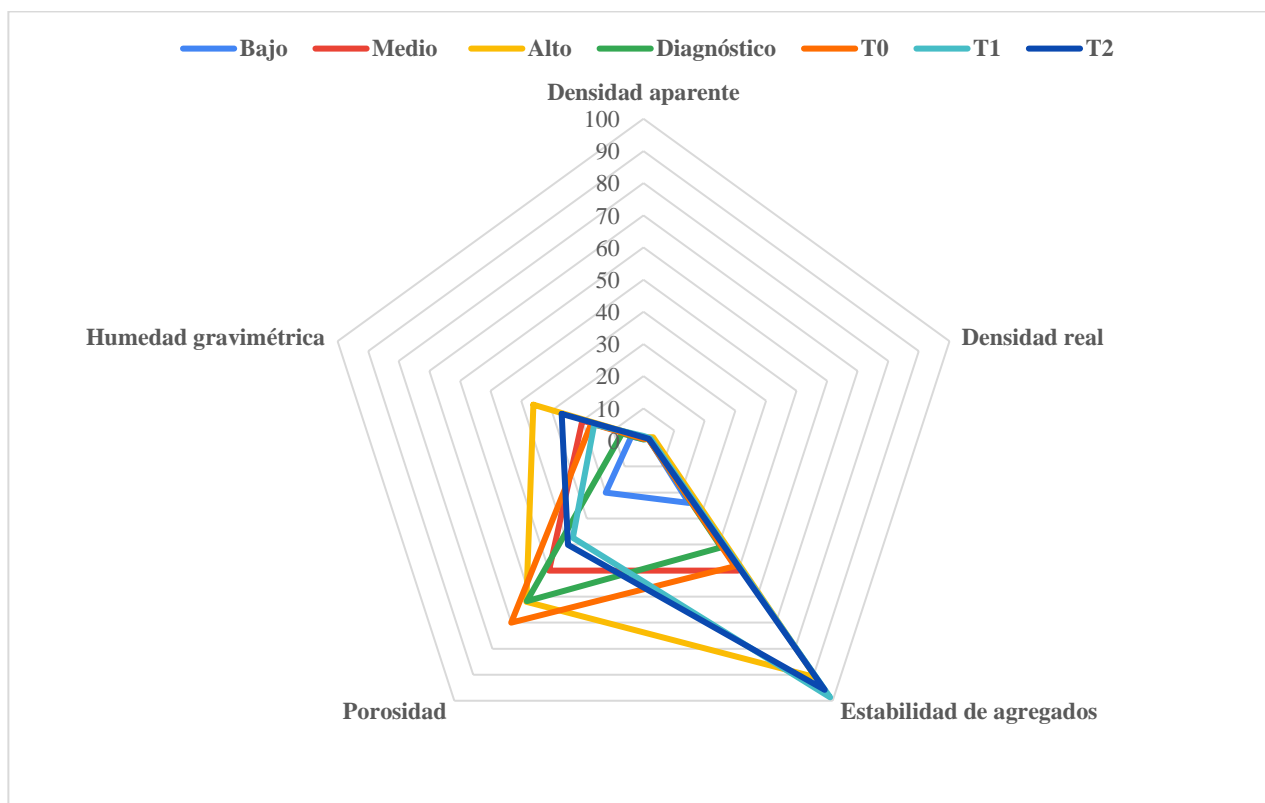


Fuente: Autora, 2023

El valor de pH para el diagnóstico, T0, T1 y T2 se encontró dentro del rango medio en cuanto fue neutro y no superó los límites de acidez y alcalinidad, mientras que la materia orgánica, carbono orgánico, nitrógeno total y conductividad eléctrica originalmente para clima frío se encontraron en el rango bajo y al adicionar las dosis de biosólidos para T1 y T2, se incrementaron hasta un nivel medio-alto respectivamente tal como se observa en la Figura 42 (IGAC, 2021). Por otro lado, la relación C/N se mantuvo durante las fases de diagnóstico y experimental, pero el fósforo, fue el que presentó la mayor variación, en cuanto al iniciar obtuvo un valor alto casi alcanzando el límite superior para este parámetro, en el T0 superó este valor como se observa con facilidad en la Figura 42 a diferencia de que para T1 y T2 disminuyó y se ajustó al rango de valores instaurado como medio (IGAC, 2021).

Con respecto a la Figura 43 se elaboró a partir de los “límites” alto, medio y bajo del rango de valores para cada uno de los indicadores físicos de calidad del suelo instaurados por el IGAC y por autores como Jaramillo J., (2002), Gómez, (2013) y la FAO, (2009). Cabe destacar que se desarrolló la misma metodología para los indicadores químicos la cual se especificó anteriormente.

Figura 43. Recuperación de propiedades físicas



Fuente: Autora, 2023

En lo que concierne a la densidad aparente para el diagnóstico presentó un valor bajo, que incrementó en el T0 a un rango bajo-medio, superó el límite máximo en el T1 mientras que para el T2 se estabilizó en la categoría media-alta, por otro lado, los valores de densidad real en la fase de diagnóstico fueron bajos al igual que con el T0 mientras que para los tratamientos 1 y 2 las magnitudes se clasificaron de bajo a medio (FAO, 2009; Gómez, 2013; Pulido et al., 2014). Como se observa en la Figura 43 los valores de estabilidad de agregados para el tratamiento 1 y 2 sobrepasan el límite superior instaurado mientras que en el diagnóstico y T0 se mantuvieron en el nivel bajo-medio (IGAC, 2006).

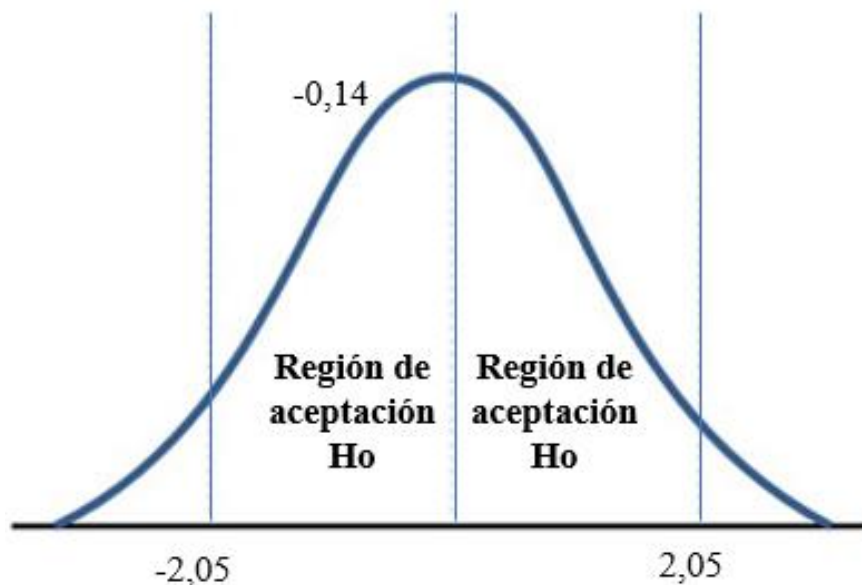
Situación contraria ocurre con el parámetro de porosidad debido que para diagnóstico y T0 se encasillaron en un valor alto en cuanto sobrepasaba este límite y para el T1 y T2 estas magnitudes descendieron hasta lograr clasificarse en el rango medio (Kaurichev, 1984). Finalmente, la humedad gravimétrica oscilo en el rango de bajo a medio para la muestra de diagnóstico, T0 y T1 mientras que para T2 se instauró como nivel medio-alto (Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección de Agrología, 2015).

7.3.2. Comprobación hipótesis. Implementación T Student

Teniendo en cuenta que la hipótesis nula de la presente investigación es “*Todas las dosis de biosólidos de los tratamientos evaluados contribuyeron en la recarbonización y recuperación del suelo de la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición*” y la hipótesis alterna es “*Al menos una dosis de biosólidos del tratamiento evaluado contribuyó a la recarbonización y recuperación del suelo de la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición*” se desarrolló la prueba T-Student con el objetivo de rechazar o aceptar la hipótesis nula siguiendo los pasos instaurados en la sección de metodología bajo un nivel de significancia de 0,05.

Al momento de estimar el valor T estadístico de prueba, se obtuvo un valor de -0,14 refiriéndose al valor calculado utilizado para determinar si existe una diferencia significativa entre las medias calculadas para los dos grupos poblacionales (T1 y T2) (Martínez Bencardino, 2019). Posteriormente, se halló los grados de libertad con el objetivo de calcular el valor crítico, obteniendo un valor de 2,05 el cual se ubicó en la curva de distribución a la derecha e izquierda de esta con valores positivos y negativos como se observa en la Figura 44, instaurando dos regiones: aceptación de la hipótesis nula que se ubica entre los dos límites (positivo y negativo) y rechazo de la hipótesis nula que es sobrepasando los valores instaurados (Martínez Bencardino, 2019).

Figura 44. Curva de distribución



Fuente: Autora, 2023

Debido que el valor T- Estadístico de prueba fue de -0,14 como se observa en la Figura 46, se ubica en la región de aceptación de la hipótesis nula en cuanto no sobrepasa los límites positivo ni

negativo del valor crítico, por lo tanto, para comprobar que realmente se acepta la hipótesis nula se estimó el P^5 más conocido como p-valor obteniendo un resultado de 0,88 el cual claramente es mayor al valor de significancia de 0,05 (By Student, 1908). Finalmente, al aceptar la hipótesis nula a través de la prueba T-Student significa que no se encontró la evidencia estadística suficiente para rechazarla, es decir, que no existe una diferencia significativa entre las medias de los dos grupos (T1 y T2) comparados, así mismo, es pertinente afirmar que *“Todas las dosis de biosólidos de los tratamientos evaluados contribuyeron en la recarbonización y recuperación del suelo de la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición”* porque como se evidencia a lo largo de los resultados, análisis y discusión principalmente de los objetivos específicos 2 y 3 ambas dosis de biosólidos aplicadas para el Tratamiento 1 y Tratamiento 2 son eficientes en ser una estrategia de recarbonización y recuperación de suelos en la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición -RCD (Usaquén-Bogotá D.C.).

8. Conclusiones

Para demostrar la insostenibilidad y severidad de la operación de la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición- RCD (Usaquén-Bogotá D.C.), se implementaron las matrices de aspectos e impactos ambientales y de Vicente Conesa, consideradas herramientas de carácter cualitativo y cuantitativo respectivamente, útiles y esenciales, a partir de las cuales se obtuvo como resultado sobre el recurso suelo, un impacto de naturaleza negativa de importancia moderada a crítica.

El diagnóstico inicial del suelo objeto de estudio, permitió identificar la necesidad de realizar el seguimiento a los indicadores de calidad del recurso, los cuales fueron: pH (7,31), nitrógeno total (0,14%), capacidad de intercambio catiónico (12,150 meq/100), fósforo disponible (45,09ppm), materia orgánica (2,75%), carbono orgánico (1,594%), relación C/N (11,4), conductividad eléctrica (0,0075 dS/m), densidad aparente (0,30 g/cm³), porosidad (81,27%), estado de agregación (inestable) y porcentaje de humedad gravimétrica (7,06%).

El diagnóstico de los parámetros físicos y químicos de los biosólidos utilizados en el proceso de recarbonización y recuperación, de la presente investigación, se ajustaron a los rangos establecidos por la EPA (Environmental Protection Agency) y de diferentes autores a nivel internacional, destacando pH (6,74), porcentaje de humedad (89,6%), conductividad eléctrica (10,7 dS/m), relación C/N (15) y capacidad de intercambio catiónico (5,42 meq/100).

El diseño y construcción del prototipo ex situ bajo los ideales de la metodología “column study” desarrollada por varios autores a nivel internacional y que permitió el desarrollo de los procesos de recarbonización y recuperación de suelos, se puede llegar a considerar un artefacto de carácter ingenieril, dado que para su ejecución fue necesaria la aplicación de principios y técnicas para planificar, fabricar y mantener la estructura.

El diseño y construcción del prototipo ex situ para monitorear los procesos de recarbonización y recuperación de suelos bajo condiciones controladas fue ideal para identificar la influencia de los parámetros de pH, conductividad eléctrica, temperatura edáfica, temperatura ambiente y humedad sobre la concentración de carbono orgánico del suelo, donde a lo largo de los 4 meses de la fase experimental se evidenció que las réplicas de cada tratamiento era un ambiente único a pesar de que se encontraban en condiciones ambientales e internas similares.

El aumento del porcentaje de carbono orgánico del suelo indicó el éxito obtenido tras la adición de biosólidos como una estrategia sostenible de recarbonización y recuperación del recurso, debido a que se obtuvieron valores para cada uno de los tratamientos de 1,84% (T0), 3,91% (T1) y 4,79% (T2), afirmando que se cumplió con la prioridad establecida por la herramienta de RECSOIL (Recarbonización de los suelos del mundo) en cuanto se aumentó la reserva de COS en un suelo degradado.

El desarrollo de la prueba T-Student permitió aceptar la hipótesis nula, la cual establece que *“Todas las dosis de biosólidos de los tratamientos evaluados contribuyeron en la recarbonización y recuperación del suelo de la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición”* debido que, a lo largo del análisis y discusión de los resultados obtenidos en la presente investigación se evidencia que las dosis de biosólidos aplicadas, recarbonizan los suelos, al aumentar el porcentaje de carbono orgánico y además recuperan algunos de los indicadores físicos y químicos de calidad del recurso.

9. Recomendaciones

El amplio campo de la ingeniería ambiental no cohibe de realizar actividades relacionadas al sector económico de la construcción, sino de prevenir y minimizar los efectos causados por la incorrecta disposición y posterior tratamiento de los residuos generados durante el desarrollo de procesos involucrados en este sector, para así, fomentar la implementación de esta idea innovadora en empresas dedicadas al tratamiento de residuos de construcción y demolición, contribuyendo a la creación de un plan de compensación.

Replicar este tipo de estudios a nivel *in situ* con el objetivo de evaluar los efectos de las condiciones ambientales sobre los procesos de recarbonización y recuperación de suelos degradados, de igual manera, es factible que para futuras investigaciones se tenga en cuenta la cuantificación de los metales pesados y microorganismos patógenos presentes en los biosólidos e identificar las posibles repercusiones que estos pueden traer sobre el recurso suelo.

A nivel *in situ*, identificar si durante la implementación de la técnica se presenta la liberación de gases de efecto invernadero y cuantificarlos a medida que ocurre el secuestro de carbono con el objetivo de comparar los niveles de emisión.

10. Referencias Bibliográficas

- AGRILAB. (2023). *¿ Quiénes somos?* <https://agrilab.com.co/nosotros/>
- Al-Joulani, N. (2008). Soil contamination in Hebron district due to stone gutting industry. *Jordan Journal of Applied Sciences - Natural Sciences*, 10(1), 37–50.
- Alcaldía Local de Usaquén. (2021). *Plan Ambiental Local de Usaquén 2021-2024*. www.suba.gov.co
- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2017). *Identificación y Evaluación de aspectos e impactos ambientales*. [https://scj.gov.co/sites/default/files/procesos_procedimientos/Identificación y Evaluación de Aspectos e Impactos Ambientales PD-DS-1_0_0.pdf](https://scj.gov.co/sites/default/files/procesos_procedimientos/Identificación_y_Evaluación_de_Aspectos_e_Impactos_Ambientales_PD-DS-1_0_0.pdf)
- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., & Secretaría Distrital de Ambiente. (2023). *Lineamientos de la política de RCD en Bogotá*. <https://www.ambientebogota.gov.co/residuos-de-construccion-y-demolicion>
- Alimentos SAS S.A.S. (2022). *¿ Quiénes Somos?* <https://www.alimentossas.com/Quienes-Somos>
- Almendro-Candel, M. B., Jordán, M. M., Navarro-Pedreño, J., Mataix-Solera, J., & Gómez-Lucas, I. (2007). Environmental evaluation of sewage sludge application to reclaim limestone quarries wastes as soil amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(6), 1328–1332. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.12.008>
- Arango Salas, J. E., & Forero Higuera, Ó. L. (2019). *Diseñar, construir, implementar y operar un centro de aprovechamiento de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) para recibir y transformar los RCD aprovechables y producir materiales de construcción a través de una planta fija ubicada en la sede oper*.
- Arboleda González, J. A. (2008). *Manual de evaluación de impactos ambientales, de proyectos, obras o actividades*.
- ArcGIS. (2023). *Interpolar Puntos*. <https://enterprise.arcgis.com/es/portal/latest/use/interpolate-points.htm>
- Arias Enríquez, J. (2021). *La Naturaleza y la Vida Silvestre y su importancia para nuestras vidas*. Universidad Católica de San Pablo. <https://ucsp.edu.pe/naturaleza-y-vida-silvestre-y-su-importancia-para-nuestras-vidas/#:~:text=En este sentido es importante,el bienestar de todos nosotros.>
- Ávila Galeano, A. Y. (2018). *Formulación del Estudio de Impacto Ambiental para la “Mina de la Gobernación” en Pesca, Boyacá*. http://journal.stainkudus.ac.id/index.php/equilibrium/article/view/1268/1127%0Ahttp://publicacoes.cardiol.br/portal/ijcs/portugues/2018/v3103/pdf/3103009.pdf%0Ahttp://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-75772018000200067&lng=en&tlng=
- Baena Paz, G. (2017). *Metodología de la Investigación*. <http://www.editorialpatria.com.mx/pdf/files/9786074384093.pdf>
- Becerra Hinestroza, J. B. (2019). *Análisis del impacto ambiental de residuos de construcción y demolición (RCD) generado en reformas domiciliarias y gestionado en las escombreras del municipio de Medellín-Antioquia*. 1–104.
- Börjesson, G., & Kätterer, T. (2018). Soil fertility effects of repeated application of sewage sludge in two 30-year-old field experiments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 112(3), 369–385. <https://doi.org/10.1007/s10705-018-9952-4>
- Bozkir, V. (2021). *El suelo es la solución*. ONU.
- Bueno Márquez, P., Díaz Blanco, M. J., & Cabrera Capitán, F. (2010). *Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de Compostaje*.
- By Student. (1908). The Probable Error of a Mean. *Biometrika*, 6, 25.
- Camacho, C., Ordoñez, N., Gutiérrez, J., Bolívar, A., Alvarez, G., Guevara, M., Olivera, C., Olmedo, G. F., Bunning, S., & Vargas, R. (2021). Estimation of soil organic carbon in Colombia, a territory management tool. *Ecosistemas*, 30(1), 1–11. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2019>

- Campos Segura, R. (2017). *Manual de Suelos: Guía de laboratorio y campo*.
- CAR. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2022). *Objetivos y Funciones*. <https://www.car.gov.co/vercontenido/5>
- Castellanos-Rozo, J., Merchán, N. A., Galvis, J., & Manjarres, E. H. (2018). Deshidratación de los lodos en lecho de secado y su influencia sobre la actividad biológica de los microorganismos. *Gestión y Ambiente*, 21(2), 242–251. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n2.75876>
- Castellanos, J. Z. (2000). *Manual de interpretación de Análisis de Suelos, Aguas agrícolas, plantas y ECP*.
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. (2013). Estabilidad de los agregados del suelo tamizando en húmedo. Guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo. *Programa de Investigación Del Cambio Climático Agricultura y La Seguridad Alimentaria Del CGIAR (CCAFS)*.
- Cerón, L., & Aristizábal, F. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285–295.
- Conesa, V. (1997). *Guía metodológica para la evaluación de impacto ambiental* (E. Mundi Prensa (ed.)).
- Congreso de Colombia. (1979). *Ley 9 de 1979*.
- Congreso de Colombia. (1993). *Ley 99 de 1993*.
- Congreso de Colombia. (1997). *Ley 388 de 1997*.
- Congreso de Colombia. (2001). *Ley 685 de 2001*.
- Consejo Local de Gestión del Riesgo y Cambio Climático CLGR-CC. (2017). *Caracterización General de Escenarios de Riesgo*.
- Cortés, A., & Malagón, D. (1984). *Los levantamientos agrológicos y sus aplicaciones múltiples*. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Cui, M., Chen, Y., Li, C., Yin, J., Li, J., & Zheng, J. (2021). Parent and methyl polycyclic aromatic hydrocarbons and n-alkanes emitted by construction machinery in China. *Science of the Total Environment*, 775, 144759. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144759>
- Delibacak, S., Voronina, L., Morachevskaya, E., & Ongun, A. R. (2020). Use of sewage sludge in agricultural soils: Useful or harmful. *Eurasian Journal of Soil Science*, 9(2), 126–139. <https://doi.org/10.18393/ejss.687052>
- Dickinson, D. (2019). *Unos 24.000 millones de toneladas de suelo fértil se pierden cada año por la desertificación*. ONU Noticias. <https://news.un.org/es/story/2019/06/1457861>
- Duarte Velasco, O. G. (2000). *Técnicas difusas en la Evaluación de Impacto Ambiental*. Universidad de Granada.
- Echeverri, J. (2018). *Dinámica del fósforo en suelo-planta en regiones tropicales*.
- Elliot, H. A., & Dempsey, B. A. (1991). Agronomic effects of land application of water treatment sludges. *JAWWA*, 83.
- EPA. United States Environmental Protection Agency. (1976). *Application of Sewage Sludge to Cropland: Appraisal of Potential Hazards of the Heavy Metals to Plants and Animals*.
- EPA. United States Environmental Protection Agency. (1984). *Environmental Regulations and Technology. Use and Disposal of Municipal Wastewater Sludge*.
- EPA. United States Environmental Protection Agency. (2000). *Folleto informativo de tecnología de biosólidos. Aplicación de biosólidos al terreno*.
- EPA. United States Environmental Protection Agency. (2023). *Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente*. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. In *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación* (Vol. 3, Issue 4). file:///C:/Users/Alina Belen Ortiz/Downloads/a0541s00 (1).pdf
- FAO. (2017). Mapa de Carbono Orgánico del Suelo. *Alianza Mundial Por El Suelo*, 1–5.

<http://www.fao.org/3/i8195es/I8195ES.pdf>

- FAO. (2018). *Protocolo de monitoreo de biosólidos*. 1–32.
- FAO. (2020). Recarbonización de los suelos del mundo. *Alianza Mundial Por El Suelo*, 12.
- FAO. (2021). *Recarbonizing global soils. A technical manual of recommended management practices* (Vol. 3).
- FAO. (2023). *Portal de Suelos de la FAO. Propiedades Químicas*. [https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/#:~:text=Capacidad de Intercambio Catiónico \(CIC\)&text=El nivel de CIC indica,o pobre en materia orgánica](https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/#:~:text=Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)&text=El nivel de CIC indica,o pobre en materia orgánica).
- FAO, & GTIS. (2015). Estado Mundial del Recurso Suelo. In *Alianza Mundial por el Suelo: Vol. I* (Issue September). <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
- FAO, & MADS. (2018). *Guía de las buenas prácticas para gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales*. http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/suelo/Guia_de_buenas_practicas_para_la_gestion_y_uso_sostenible_de_los_suelos_en_areas_rurales.pdf
- Fernández, J. M., Plaza, C., García-Gil, J. C., & Polo, A. (2009). Biochemical properties and barley yield in a semiarid Mediterranean soil amended with two kinds of sewage sludge. *Applied Soil Ecology*, 42(1), 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.01.006>
- Flores delgadillo, L., & Alcalá Martínez, J. R. (2010). Manual de Procedimientos Analíticos. *Instituto de Geología (UNAM)*, 56. https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL_DEL_LABORATORIO_DE_FISICA_DE_SUELOS1.pdf
- Flores Márquez, J. P., Valero Córdoba, C., Osuna Ávila, P., Corral Díaz, B., Shikla, M. ., & Salazar Sosa, E. (2013). Textura del suelo y tipo de agua de riego en la disponibilidad de fósforo de estiércol bovino. *Terra Latinoamericana*, 211–220.
- Galvín, A. P., Ayuso, J., Jiménez, J. R., & Agrela, F. (2012). Comparación de pruebas de lixiviación discontinua e influencia del pH en la liberación de metales de residuos de construcción y demolición. *Waste Management*, 32, 88–95.
- Gamarra, C., Díaz Lezcano, M. I., Vera de Ortíz, M., Galeano, M. D. P., & Cabrera Cardús, A. J. N. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(46), 4–26. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.134>
- Garavito, F. (1974). Propiedades Químicas de los Suelos. *IGAC*, 10.
- Giraldo, Ó. E., & Lozano de Yunda, A. (2004). Mineralización de los biosólidos secados de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre adicionados a un suelo erosionado. *Revista de La Sociedad Colombiana de La Ciencia Del Suelo*, 34, 42–48.
- Gómez, J. (2013). Manual de Prácticas de Campo y del Laboratorio de Suelos. *Servicio Nacional de Aprendizaje*, 100. https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/11404/2785/1/practicas_campo_laboratorio_suelos.pdf
- González-Ubierna, S., Jorge-Mardomingo, I., Cruz, M. T., Valverde, I., & Casermeiro, M. A. (2013). Sewage sludge application in mediterranean agricultural soils: Effects of dose on the soil carbon cycle. *International Journal of Environmental Research*, 7(4), 945–956.
- Guacaname, S., & Barrera, J. I. (2007). Efecto de la aplicación de biosólidos, como enmienda orgánica, en la recuperación de un suelo disturbado por actividad extractiva en la cantera de Soratama, Localidad de Usaquén, Bogotá. *Universitas Scientiarum*, 12, 85–98. <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=49912208>
- Guerrero, D. (2023). ¿ Por qué la construcción es clave para que el PIB de Colombia sea bueno en 2023? *Bloomberg Línea*.
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación* (Vol. 6).

- Hughes- DeJong, J., Moncrief, J. F., Voorhees, W. B., & Swan, J. B. (2018). Soil compaction :Causes, effects and control. *Soil Management and Health: Agriculture: University of Minnessota Extension*, 1–13.
- Ibarra, D. J., Ruíz, A., González, R., & Flores, J. G. (2008). Clasificación espacial de la textura de los suelos agrícolas de Zapopan Jalisco. *Avances de La Investigación Científica En El CUCBA*.
- IGAC. (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelo*. 6ta edición, 674.
- IGAC. (2017). *Uso inadecuado del suelo en Colombia: un generador de Gases de Efecto Invernadero*. <https://igac.gov.co/es/noticias/uso-inadecuado-del-suelo-en-colombia-un-generador-de-gases-efecto-invernadero>
- IGAC. (2021). *Descripción y muestreo de suelos*.
- IGAC. (2022a). *¿Quiénes Somos?* <https://www.igac.gov.co/es/contenido/nuestro-proposito-central>
- IGAC. (2022b). *Colombia en Mapas*. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/inicio/>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección de Agrología. (2015). *Suelos y Tierras de Colombia*.
- Instituto Geografico Agustin Codazzi - IGAC. (2011). *Guía de recomendaciones para la toma de muestras para análisis del Laboratorio nacional de suelos*. 8. <http://www.igac.gov.co/wps/wcm/connect/2a9cf2804bc71ca3a9d8af94cce61b94/OK+GUIA+DE+TRAMITES.pdf?MOD=AJPERES>
- Jaramillo G., L. A. (2002). Elementos para una reglamentación de Biosólidos. *45° Expo-Congreso Internacional de ACODAL*, 9–20. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005609/DocumentosOffice/viernes/Mo dulodeGestiondelosResSolToxPeli/ElementosparaunareglamentaciondelosBiosolidos.pdf>
- Jaramillo J., D. F. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*.
- Jiménez Vélez, V. C. (2020). Evaluación de bacterias y hongos potencialmente utilizables para la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos. *Universidad Agraria Del Ecuador*, 126. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/JIMENEZ VELEZ VILMA CECIBEL.pdf>
- Johnston, A. E., & Syers, J. K. (2009). A New Approach to Assessing Phosphorus Use Efficiency in Agriculture. *Better Crops*, 93, 14–16.
- Kalisz, B., Łachacz, A., Głazewski, R., & Grabowski, K. (2017). Labile organic carbon fractions after amendment of sandy soil with municipal sewage sludge and compost. *Journal of Elementology*, 22(3), 785–797. <https://doi.org/10.5601/jelem.2017.22.1.1264>
- Kanteraki, A. E., Isari, E. A., Svarnas, P., & Kalavrouziotis, I. K. (2022). Biosolids: The Trojan horse or the beautiful Helen for soil fertilization? *Science of the Total Environment*, 839(March), 156270. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156270>
- Kaurichev, I. S. (1984). *Prácticas de edafología* (Mir.Moscú (ed.); 1ª).
- Laureda, D. A., Botta, G. F., Tolón Becerra, A., & Rosatto, H. G. (2016). Compactación del suelo inducida por la maquinaria en campos de polo en Argentina. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 48(1), 79–99.
- Lefèvre, C., Rekik, F., Alcantara, V., & Wiese, L. (2017). *Carbono orgánico del suelo potencial oculto*.
- Marchevsky, N. J., Giubergia, A. A., & Ponce, N. H. (2018). *Evaluación de impacto ambiental de la cantera “La Represa”, en la provincia de San Luis, Argentina*.
- Martínez Bencardino, C. (2019). *Estadística Básica Aplicada* (ECO Ediciones (ed.); Quinta Edi).
- Martínez, L. M. (2010). *La Bitácora de Laboratorio: Instrumento de Investigación y Trabajo*.
- Mendenhall, W., Beaver, R. ., & Beaver, B. . (2010). *Introducción a la probabilidad y estadística* (Cengage Learning (ed.); 13.a Edici).
- Minambiente. (2016). Política para la Gestión Sostenible del Suelo. In *Política para la Gestión Sostenible del Suelo*. http://www.andi.com.co/Uploads/Política_para_la_gestión_sostenible_del_suelo_FINAL.pdf
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2009). *Resolución 0170 de 2009*.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). *Política Nacional para la Gestión Integral Ambiental del Suelo (GIAS)*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Resolución 472 de 2017*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Resolución 1257 de 2021*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.minambiente.gov.co/ventana/objetivos/#:~:text=El Ministerio de Ambiente y,la recuperaci3n%2C conservaci3n%2C protecci3n%2C>
- Ministerio de Minas y Energía, Instituto Colombiano de Geología y Minería, & Ingeominas. (2005). *Geología de la sabana de Bogotá*.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2014). *Decreto 1287 de 2014*.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2018). *Decreto 2412 de 2018*.
- Mir, M., Nasirzadeh, F., Bereznicki, H., Enticott, P., Lee, S. H., & Mills, A. (2023). Construction noise effects on human health: Evidence from physiological measures. *Sustainable Cities and Society*, 91(January), 104470. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104470>
- Morgan, R. P. . (2005). *Soil Erosion & Conservation* (Third Edit). Blackwell Publishing.
- Moyeja Santana, J. de J. (2015). Nutrición vegetal (II). *Instituto de Investigaciones Agropecuarias (IIAP)*, 8–13.
- Navas Ríos, G. E. (2006). *Alternativas y estrategias para la recuperación de suelos degradados*.
- Neilsen, G. H., Hogue, E. J., Neilsen, D., & Zebarth, B. J. (1998). Evaluation of organic wastes as soil amendments for cultivation of carrot and chard on irrigated sandy soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 78(1), 217–225. <https://doi.org/10.4141/S97-037>
- Nunez, C. (2023). ¿ Qué son los gases de efecto invernadero y cuáles son sus efectos? *NATIONAL GEOGRAPHIC*.
- OIKOS. Constructora. (2023). *Aportes que genera la industria de la construcción a la economía del país*. <https://www.oikos.com.co/constructora/noticias-constructora/sector-de-constructoras-en-economia-de-colombia>
- Olivera Sánchez, C., & Avellaneda Torres, L. M. (2018). *Guía de buenas prácticas para la gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales : construcción participativa del diagnóstico de suelos,diseño de planes de intervención prácticas de manejo sostenible de los suelos*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/35025>
- OMS - Organización Mundial de la Salud. (2023). ¿ Cómo define la OMS la salud? <https://www.who.int/es/about/frequently-asked-questions#:~:text=¿Cómo define la OMS la,ausencia de afecciones o enfermedades»>.
- Ortiz Bernard, I., Sanz García, J., Dorado Valiño, M., & Villar Fernández, S. (2007). *Técnicas para la recuperación de suelos contaminados*. 109. http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf
- Ozores-Hampton, M., Stansly, P. A., McSorley, R., & Obreza, T. A. (2005). Effects of long-term organic amendments and soil solarization on pepper and watermelon growth, yield, and soil fertility. *HortScience*, 40(1), 80–84. <https://doi.org/10.21273/hortsci.40.1.80>
- Peñarete M, W., Silva-Leal, J., Urrutia C, N., Daza T, M., & Torres Lozada, P. (2020). Efecto de aplicación de biosólidos sobre las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar. *Ciencias Del Suelo*, 251–260.
- Perdomo Sierra, N., & Guevara Chacón, L. M. (2020). *Residuos de construcción y demolición (RCD), en la ciudad de Bogotá y la metodología PMBOK*.
- Pérez Toro, W. A. (2018). *Relación C/N en zonas de aplicación de fertilizantes y de absorción de nutrientes en banano Williams*. 93. <http://bdigital.unal.edu.co/71366/>
- Pinzón Pinto, Á. (2003). Análisis e interpretación de propiedades físicas determinadas en el

laboratorio. *Manejo Integral de La Fertilidad Del Suelo*.

- Pitombo, L. M., Do Carmo, J. B., De Maria, I. C., & De Andrade, C. A. (2015). Carbon sequestration and greenhouse gases emissions in soil under sewage sludge residual effects. *Scientia Agricola*, 72(2), 147–156. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2013-0352>
- Porta, J., López Acevedo, M., & Poch M, R. (2014). *Edafología. Uso y protección de suelos*.
- Potisek Talavera, M. C., González Cervantes, G., Figueroa-Viramontes, U., Rodolfo Jasso-Ibarra, R., & Orona-Castillo, I. (2010). Aplicación de biosólidos al suelo y su efecto sobre contenido de materia orgánica y nutrimentos. Soil applied biosolids and its effect on soil organic matter and nutrient content. *Terra Latinoamericana*, 28(4), 327–333. <http://www.chapingo.mx/terra/?module=resumenes&volumen=28&numero=4>
- Presidente de la República de Colombia. (1974). *Decreto 2811 de 2974*.
- Pulido, C., Fernandez, J., Pinzón, Á., Ramirez, R., Cardenas, D., & Gallardo, J. (2014). Propiedades de los Suelos. *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*.
- Sánchez Turcios, R. A. (2015). T-Student. Usos y abusos. *Revista Mexicana de Cardiología*, 26(1), 59–61.
- Santos, D., Monercillo, B., & García, A. (2013). Gestión de residuos en las obras de construcción y demolición. *Manual*, 22. http://libreria.fundacionlaboral.org/ExtPublicaciones/Gestion_residuos_2013_FINAL.pdf
- Santos Marián, D., Monercillo Delgado, B.-, & García Martínez, A. (2013). *Gestión de residuos en las obras de construcción y demolición*.
- Sanz, M., Heras, L., & Montañes, L. (1975). *Índice de correlación entre el carbono orgánico y nitrógeno en suelos de la cuenca del Ebro*.
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2023). *Ruido*. <https://www.ambientebogota.gov.co/ruido>
- Secretaría Distrital de Ambiente, & Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2021). *¿ Sabes qué son los Residuos de Construcción y Demolición (RCD), y cómo disponerlos desde tu casa o empresa?* [https://www.ambientebogota.gov.co/historial-de-noticias/-/asset_publisher/VqEYxdh9mhVF/content/-sabes-que-son-los-residuos-de-construccion-y-demolicion-rcd-y-como-disponerlos-desde-tu-casa-o-empresa-#:~:text=Principal \(EEP\).-El inadecuado manejo de RCD g](https://www.ambientebogota.gov.co/historial-de-noticias/-/asset_publisher/VqEYxdh9mhVF/content/-sabes-que-son-los-residuos-de-construccion-y-demolicion-rcd-y-como-disponerlos-desde-tu-casa-o-empresa-#:~:text=Principal (EEP).-El inadecuado manejo de RCD g)
- Shrestha, R. K., & Lal, R. (2011). Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. *Geoderma*, 161(3–4), 168–176. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.015>
- Smith, D., & McGuire, J. (1998). *Biosolids help revegate limestone quarry*. 101(7), 52–53.
- Sociedad Española de las Ciencias del Suelo. (2018). *Técnicas biológicas de recuperación de suelos*.
- Soriano-Disla, J. M., Navarro-Pedreño, J., & Gómez, I. (2010). Contribution of a sewage sludge application to the short-term carbon sequestration across a wide range of agricultural soils. *Environmental Earth Sciences*, 61(8), 1613–1619. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0474-x>
- Stocks, J., & Down, C. G. (1984). *Chapter 4. Environmental Impacts of Mining and Mineral Processing*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804040-9.00004-8>
- Suárez, T. M., & Berger, G. (2009). Descripciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera. *Editorial Universitaria de Misiones*.
- Taguena Belmonte, J. A., & Vega Busar, M. del R. (2012). Técnicas de Investigación Social. Las entrevistas abierta y semidirectiva. *Revista de Investigación En Ciencias Sociales y Humanidades, Nueva Época.*, 1(1).
- Tarbutck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física. In P. E. S.A. (Ed.), *Ciencias de la Tierra. Una introduccion a la geofísica*. (8ª edición).
- Tian, G., Granato, T. C., Cox, A. E., Pietz, R. I., Carlson, C. R., & Abedin, Z. (2009). Soil Carbon Sequestration Resulting from Long-Term Application of Biosolids for Land Reclamation. *Journal of Environmental Quality*, 38(1), 61–74. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0471>

Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.


Triola, M. F. (2009). *Estadística* (Pearson Educación (ed.); Décima Edi).

USDA - United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation. (2016). *Electrical Conductivity*. https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2023-05/EC_WTA_10-20.pdf


Estudio del proceso de recarbonización y recuperación de suelos de residuos de construcción (Usaquén-Bogotá D.C.) por medio de biosólidos.

11. Anexos

Anexo I- Resultados obtenidos del análisis físico y químico del suelo antes de la adición de biosólidos

	RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO – CARACTERIZACIÓN Q-01 LABORATORIO NACIONAL DE SUELOS-LNS-CRA 30 N° 48-51 Bogotá D.C. CARACTERIZACIÓN BÁSICA (CON CARBONO TOTAL)	FECHA DE EMISIÓN
		AAAA-MM-DD
		2023-06-07

No. DE LABORATORIO	IDENTIFICACIÓN DE CAMPO	LOCALIZACIÓN MUESTRA	PROFUNDIDAD (cm)	GRANULOMETRÍA			CLASE TEXTURAL	% DE GRAVAS (FRACCIÓN > 2 mm)	RELACIÓN DE pH	pH	ACIDEZ INTERCAMBIABLE cmol(+)/Kg	S.A.L. %	CARBONATO DE CALCIO		CARBONO ORGÁNICO %	%MO	NITRÓGENO CALCULADO %	RELACIÓN CIN
				ARENA %	LIMO %	ARCILLA %							Cuantitativo %	Cualitativo*				
MQ1-58495	PLANTA DE TRATAMIENTO DE RCD	BOGOTÁ / CUNDINAMARCA	0-30	71.3	18.4	10.3	F A	N.A.	1:1	7.310	N.A.	N.A.	N.A.	(-)	1.5944	2.75	0.14	11.39

	RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO – CARACTERIZACIÓN Q-01 LABORATORIO NACIONAL DE SUELOS-LNS-CRA 30 N° 48-51 Bogotá D.C. CARACTERIZACIÓN BÁSICA (CON CARBONO TOTAL)	FECHA DE EMISIÓN
		AAAA-MM-DD
		2023-06-07

No. DE LABORATORIO	FÓSFORO DISPONIBLE mg/Kg	COMPLEJO DE CAMBIO cmol(+)/Kg							S.B. %	Relaciones Catiónicas e Interpretación							
		CIC	CICE	Ca	Mg	K	Na	B.T.		Ca/Mg	Interpretación	Mg/K	Interpretación	Ca/K	Interpretación	(Ca-Mg)/K	Interpretación (Ca-Mg)/K
MQ1-58495	45.09*	12.150	N.A.	33.370*	1.180	0.970	0.610	36.130	SAT	28.280	Amplia con deficiencia de Mg	1.216	Estrecha	34.402	Amplia con deficiencia de K	35.619	Amplia con deficiencia de K

Anexo II- Resultados obtenidos del análisis físico y químico del biosólido



INFORME DE RESULTADOS
ÁREA DE ANÁLISIS DE MATERIALES ORGÁNICOS




Informe N° 21084-V1-2023

N° de Laboratorio AMO-01112-2023

CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL ORGÁNICO SÓLIDO				
Variable	Expresión / Sigla	Resultados	Unidades	Extractante/Técnica/Documento Normativo
Humedad	N.A.	89.6	%	40 y 70 °C / Gravimetría / NTC 5167 (r)
pH en pasta de saturación	pH	6.74	Unidades de pH	Pasta de saturación / Potenciométrico / NTC 5167 (r)
Conductividad Eléctrica	CE	10.7	dS/m	Pasta de saturación / Conductimétrico / NTC 5167 (r)
Retención de Humedad	Ret. Hum.	9.74	%	Pasta de saturación / Gravimétrico / NTC 5167 (r)
Cenizas	N.A.	3.62	%	700 °C / Gravimétrico / NTC 5167 (r)
Perdidas por Volatilización	N.A.	6.78	%	700 °C / Gravimétrico / NTC 5167 (r)
Capacidad de Intercambio Catiónico - CIC	CIC	5.42	meq/100g	Acetato de amonio / Volumétrico / NTC 5167 (r)
Densidad Real (en base seca)	N.A.	0.800	g/cm3	Directo / Gravimétrico / NTC 5167 (r)
Carbono Orgánico Oxidable Total	COOx	1.89	%	Sin. Dicromato de Potasio / Colorimétrico / NTC 5167 (r)
Relación Carbono / Nitrógeno	C/N	14	Adimensional	Relación matemática
CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN MINERAL				
Nitrógeno Total	NT	0.133	%	Sumatoria de Especies de Nitrógeno requeridas por el cliente
Nitrógeno Orgánico	N Orgánico	0.133	%	Micro-Kjeldahl / Volumetría / NTC 5167-NTC 370 (r)
Observaciones a los resultados:		Convenciones:		
El producto presenta prueba positiva para carbonatos.		N.R. No registra / N.A. No Aplica / Sin. Solución / N.S. No Suministrada / N.D. No Detectado / MVH Mineralización Via Húmeda / M.I. Muestra Insuficiente EAA Espectroscopia de Absorción Atómica / EEA Espectroscopia de Emisión Atómica / ICP-OES Espectroscopia de Emisión Óptica de plasma acoplado inductivamente / EAM Extracción Asistida con Microondas		

Anexo III- Resultados obtenidos del análisis físico y químico del suelo después de la adición de biosólidos

	RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO – CARACTERIZACIÓN Q-01 LABORATORIO NACIONAL DE SUELOS-LNS-CRA 30 N° 48-51 Bogotá D.C. CARACTERIZACIÓN BÁSICA (CON CARBONO TOTAL)	FECHA DE EMISIÓN
		AAAA-MM-DD
		2023-10-20

INFORMACIÓN DEL CLIENTE

