





VARIACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN ÁREAS DE IMPORTANCIA ECOLÓGICA DE BOGOTÁ

ANGIE VIVIANA MONTAÑEZ SALINAS - Jardín Botánico José Celestino Mutis

CAROLINA VILLEGAS VARGAS - Jardín Botánico José Celestino Mutis



 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <small>Jardín Botánico José Celestino Mutis</small>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 1 de 55	

VARIACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN ÁREAS DE IMPORTANCIA
ECOLÓGICA DE BOGOTÁ

SOIL ORGANIC CARBON VARIATION IN ECOLOGICAL IMPORTANCE AREAS OF
BOGOTÁ

ANGIE VIVIANA MONTAÑEZ SALINAS - Jardín Botánico José Celestino Mutis
CAROLINA VILLEGAS VARGAS - Jardín Botánico José Celestino Mutis

MARIBEL YESENIA VÁSQUEZ VALDERRAMA

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN EN BIODIVERSIDAD Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS
SUBDIRECCIÓN CIENTÍFICA
JARDÍN BOTÁNICO JOSÉ CELESTINO MUTIS

BOGOTÁ D.C., 2024







 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 2 de 55	

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN.....	4
2. PALABRAS CLAVE	4
3. INTRODUCCIÓN.....	4
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
4.1. Descripción del problema.....	6
4.2. Formulación del problema.....	7
4.3. Delimitación espacial y temporal.....	7
5. JUSTIFICACIÓN.....	9
6. HIPÓTESIS	11
7. OBJETIVOS	11
7.1. Objetivo General.....	11
7.2. Objetivos Específicos.....	11
8. MARCO TEÓRICO	11
9. METODOLOGÍA.....	16
9.1. Definición de la población de estudio y muestra.....	16
9.2. Métodos.....	19
9.3. Análisis de la información	23
10. RESULTADOS	23
10.1 Carbono orgánico del suelo y otras propiedades fisicoquímicas en áreas de importancia ecológica de Bogotá.....	25
10.2 Relación entre propiedades fisicoquímicas del suelo y el COS	36
10.3 Comparación entre el carbono de la vegetación y el carbono orgánico del suelo	37
11. DISCUSIÓN.....	39
11.1 Carbono orgánico del suelo y otras propiedades fisicoquímicas en áreas de importancia ecológica de Bogotá.....	39
11.2 Relación entre propiedades fisicoquímicas del suelo y el COS	42
11.3 Comparación entre el carbono orgánico de la vegetación y el carbono orgánico del suelo.....	43
12. CONCLUSIONES	44
13. RECOMENDACIONES.....	46

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 3 de 55	

14.	AGRADECIMIENTOS.....	46
15.	CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES	47
16.	CONFLICTO DE INTERESES	47
17.	BIBLIOGRAFÍA.....	47
18.	ANEXOS.....	55

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 4 de 55	

1. RESUMEN



El carbono orgánico del suelo tiene inmensas reservas globales, mayores a las reservas de la vegetación. Al igual que el resto del planeta, esta capa superficial llamada suelo ha sido objeto de transformación por la acción del hombre, de tal manera que dependiendo de su uso esta reserva puede ser tanto fuente de emisiones como de captura de carbono, y, por lo tanto, mitigar o agravar el cambio climático. En este contexto, quisimos conocer el contenido orgánico del suelo en el Jardín Botánico de Bogotá y en el área del Bosque de Las Mercedes en tres lugares: en el bosque nativo y en áreas con 5 y 2 años de restauración que rodean el bosque. Para cumplir con este objetivo tomamos 7 muestras de capa superficial de 0-30 cm de suelo del horizonte A. En cada muestra hicimos análisis de: pH, densidad aparente, % de materia orgánica, % de carbono orgánico y contenidos totales de carbono con el método de calcinación. Como resultados más importantes encontramos que el área que presentó mayor contenido de carbono orgánico del suelo fue el Bosque nativo de Las Mercedes con $276.01 \pm 35.45^b \text{ t C ha}^{-1}$, seguido del área restaurada de 5 años con $248.81 \pm 39.66 \text{ t C ha}^{-1}$, el área restaurada de 2 años con $254.41 \pm 56.87 \text{ t C ha}^{-1}$ y por último en el Jardín Botánico de Bogotá con $126.34 \pm 44.35 \text{ t C ha}^{-1}$. Estas diferencias fueron significativas y mostraron dos grupos (Anova, $F_{3,61} = 41.77$, $p < 0.001$). Como conclusiones importantes encontramos que a pesar de que en el área restaurada de Las Mercedes se haya perdido la cobertura del bosque, el carbono orgánico del suelo se mantuvo con valores similares a los del bosque nativo. Este alto contenido de carbono orgánico del suelo encontrado en Las Mercedes mostró que este compartimento –COS– fue relativamente estable, no estuvo directamente afectado por el cambio de cobertura de bosque a no bosque; por que el grueso de las emisiones por cambio de cobertura, en este caso, se dio por las pérdidas del carbono de la vegetación encima del suelo, y no por las pérdidas de carbono por debajo del suelo.

2. PALABRAS CLAVE

Mitigación, cambio de cobertura bosque a no bosque, propiedades fisicoquímicas del suelo, suelos urbanos, suelos naturales.

3. INTRODUCCIÓN

El suelo es un sistema vivo de enorme importancia para el sostenimiento de la diversidad biológica, la actividad agropecuaria y la soberanía alimentaria (Meister et al. 2012). Además, constituye uno de los mayores reservorios de carbono con un almacenamiento



 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <small>Jardín Botánico José Celestino Mutis</small>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ <small>JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ</small>
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 5 de 55	

estimado en ~1.500 Penta Giga Toneladas de C año⁻¹ en el primer metro del suelo, lo cual representa hasta tres veces más del carbono almacenado en la vegetación (FAO 2017; Meister et al. 2012). De ahí que un manejo adecuado del suelo sea fundamental para hacer frente a su degradación global y sea esencial para la mitigación del cambio climático (FAO 2017; IPCC 2019).

La materia orgánica, como componente que se incorpora al suelo es fundamental para el retorno de nutrientes y el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) (FAO 2017; Yang et al. 2020). Este carbono orgánico del suelo es resultante del balance entre el aporte de material vegetal y la liberación de CO₂ originada por la descomposición gradual de la materia orgánica por la actividad de los microorganismos (Ostertag et al. 2008; Vitousek 1984). La transformación de la materia orgánica que incluye material vegetal aportado al suelo genera una mezcla de residuos en diferentes grados de descomposición, de manera que una proporción se integra a los agregados del suelo para garantizar la persistencia del carbono orgánico del suelo por mucho tiempo; mientras que otra proporción es reintegrada a la biomasa y es denominada el carbono lábil (Hiederer 2009; Meister et al. 2012).

El carbono orgánico del suelo constituye una importante reserva de carbono (Castañeda-Martín y Montes-Pulido 2017a; FAO 2022); sin embargo, las actividades antrópicas sobre el suelo pueden implicar que este carbono se convierta en una fuente neta de gases de efecto invernadero (GEI) (Ahirwal et al. 2021; Yang et al. 2020). Se ha estimado que el cambio de uso del suelo representa entre el 12 al 20 % de la liberación de CO₂ a la atmósfera (Friedlingstein et al. 2022). Así, dependiendo del uso y manejo del suelo, este puede o bien actuar como fuente de CO₂ o convertirse en una oportunidad para salvaguardar las reservas de carbono en el suelo (FAO 2017).

Por otro lado, el potencial de captura y almacenamiento del carbono orgánico del suelo puede variar ampliamente dependiendo de las condiciones locales (FAO 2017). En ecosistemas andinos y alto andinos se ha reportado una disminución en coberturas transformadas como pastizales y cultivos con alta intensidad de uso (Carvajal et al. 2009). Adicionalmente, en ecosistemas de bosque alto andino y páramo (> 2600 m.s.n.m) se presenta un alto almacenamiento debido a que la materia orgánica presenta bajas tasas de descomposición y por lo tanto el carbono orgánico del suelo se almacena lentamente en largos periodos de tiempo (Castañeda-Martín y Montes-Pulido 2017a; Peña-Quemba, Rubiano-Sanabria, y Riveros-Iregui 2016). En condiciones de ciudad, se esperaría que en bosques urbanos con especies propias del bosque andino y alto andino, se presenten dinámicas de carbono similares; sin embargo aún se desconoce su capacidad de almacenamiento (Russo et al. 2014). De ahí la importancia de avanzar en el estudio del

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 6 de 55	

carbono orgánico del suelo en bosques y coberturas vegetales inmersas en las ciudades, las cuales son esenciales para la mitigación y adaptación al cambio climático (Weissert, Salmond, y Schwendenmann 2014).

Teniendo en cuenta lo anterior es importante conocer a escala local cuánto CO₂ captura el suelo en contextos urbanos, rurales y naturales y en escalas de tiempo y uso específicos, para de esta manera saber si ¿es mucho?, ¿es poco? y de qué manera este compartimento de captura y almacenamiento de carbono puede ser útil y considerable para orientar acciones de manejo y uso del suelo frente a la recuperación de coberturas y la mitigación del cambio climático.




4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

4.1. Descripción del problema

El aumento de las emisiones de carbono en el planeta ha generado un aumento sostenido de la temperatura promedio mundial y el cambio climático, que con alto nivel de confianza ha sido causado por las actividades humanas (IPCC 2019). Ante este cambio climático, el papel de los suelos en el ciclo del carbono es esencial, por ser la segunda reserva más importante de carbono en el planeta luego de los océanos (Janzen 2004) y la primera en ecosistemas terrestres (Castañeda-Martín y Montes-Pulido 2017b; Friedlingstein et al. 2019; H. H. Janzen 2004; Lal 2004; Paustian et al. 2019; Zomer et al. 2017). Por esta considerable cantidad de carbono orgánico que los suelos acumulan, es esencial entender el papel de la dinámica del carbono orgánico del suelo (Lal 2004).

En este desequilibrado sistema climático, los suelos son esenciales por ser altamente sensibles al clima (Jones et al. 2005), y a largo plazo secuestrar carbono (Nazir et al. 2024). Para comprender cuánto carbono orgánico secuestra el suelo, es importante considerar que el suelo pierde CO₂ al respirar, y esta actividad depende de la actividad microbiana, además de múltiples condiciones biofísicas (Jones et al. 2005; Lal 2004).

Para que el suelo deje de ser una fuente y se convierta en una trampa de carbono, es necesario gestionar el suelo mediante acciones restaurativas asociadas a la cobertura, los residuos, el compostaje, el estiércol y otros métodos que favorezcan la descomposición y acumulación de carbono estable por períodos prolongados (Lal 2004; Nazir et al. 2024). La ejecución de estas acciones adecuadas en el suelo podría aumentar el impacto de la captura de carbono y mitigar cambio climático a largo plazo (Bajgai et al. 2014).

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <small>Jardín Botánico José Celestino Mutis</small>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ 
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 7 de 55	

El suelo actúa como fuente de carbono debido al cambio de las coberturas naturales de la tierra (Nazir et al. 2024), pero esta condición puede cambiar si se conoce y disminuye la incertidumbre ante la cual el suelo puede ser una trampa de carbono. En este cambio de fuga a trampa de carbono, es necesario conocer a escalas locales qué ocurre con el suelo, ¿cuánto carbono orgánico captura y almacena? para disminuir la incertidumbre, y tener datos menos ambiguos. Datos que orienten acciones para absorber las emisiones de carbono en áreas urbanas con diferentes coberturas vegetales de la Sabana de Bogotá, a mediano y largo plazo.



4.2. Formulación del problema

En un contexto actual de pérdida de biodiversidad, cambio de uso del suelo y cambio climático, es fundamental entender el almacenamiento del carbono orgánico del suelo y su variación en bosques naturales, áreas urbanas y coberturas vegetales de las ciudades. En algunas áreas los suelos se han impermeabilizado por la transformación urbana, y en otros casos presentan niveles medios a altos de cambio de uso. De esta manera, en Bogotá se presentan formas de uso y manejo del suelo diferentes, en algunos sitios con suelos creados para soportar diversos estratos de vegetación, como en el Jardín Botánico de Bogotá; mientras otros sitios presentan coberturas de bosque andino en proceso de restauración, como el Predio Las Mercedes de la Reserva Thomas van der Hammen.

En este sentido, se resalta la importancia de estudiar el rol del suelo en el almacenamiento del carbono orgánico del suelo en sitios estratégicos de la Estructura Ecológica Principal de la ciudad, así como evaluar el cambio de las reservas de carbono orgánico del suelo en el tiempo. Se espera que las acciones de restauración y conservación que hacen parte de proyectos de mitigación de GEI, favorezcan un aumento del carbono orgánico del suelo y con ello contribuyan a mitigar los efectos del cambio climático. Así, esta investigación se orientará a evaluar ¿cómo es la variabilidad del carbono orgánico del suelo en áreas de importancia ecológica de Bogotá? y ¿qué tanto cambian estas reservas entre dos áreas de importancia ecológica: el Jardín Botánico y Las Mercedes?.

4.3. Delimitación espacial y temporal

El área de estudio comprende dos áreas de importancia ecológica del Distrito Capital. El Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis y el predio de Las Mercedes, que hace parte de la Reserva Forestal Regional Productora del Norte de Bogotá Thomas van der Hammen.

 <p>ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis</p>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 <p>JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ</p>
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 8 de 55	

Jardín Botánico de Bogotá

El Jardín Botánico de Bogotá es un área de interés público de 19.5 hectáreas, un centro de investigación y desarrollo científico que se concentra en el estudio de los ecosistemas alto andinos y un refugio de biodiversidad con cerca de 187 especies de plantas en sus colecciones vivas (Vargas, Callejas, y Pisco 2020). En el Jardín Botánico los suelos se han modificado a lo largo de su historia para permitir el crecimiento de las colecciones vivas que alojan una alta diversidad de especies vegetales. Estos suelos que se han clasificado como “tecnosoles”, han sido manejados con fines prácticos, incluyendo en algunas zonas presencia y acumulación escombros y rocas traídas de diferentes sectores de la ciudad desde mediados de la década de los 90s; mientras que otras zonas han tenido menor intervención.



Área Las Mercedes

El predio Las Mercedes es un área clave para conectar y conservar remanentes de bosque andino y mantener el flujo de especies entre los Cerros Orientales y el Río Bogotá (Resolución 475 del Ministerio de Medio Ambiente). Este Bosque de Las Mercedes abarca un área de 11.4 hectáreas, siendo una de las áreas mejor conservadas de la sabana de Bogotá. A pesar de su importancia, a su alrededor se realizan actividades agropecuarias, cultivo de flores, ganadería y agricultura.

En un área que abarca el bosque y lugares aledañas, el Jardín Botánico de Bogotá en áreas de propiedad del Distrito, ha llevado a cabo procesos de restauración para fomentar la conexión ecológica entre el Humedal de la Conejera y el Bosque (Suárez 2022). Esta restauración llevada iniciada en el año 2012 ha abarcado áreas de bosque con acciones de control de invasoras, y áreas aledañas con actividades propias de la restauración (Peña y Castellanos 2015).

El bosque Las Mercedes se encuentra sobre formaciones geológicas fluviolacustres que fueron el fondo de un antiguo lago que acumulo sedimentos durante los últimos 3 millones de años. Allí los suelos corresponden a las siguiente consociaciones (Peña y Castellanos 2015):

- Consociación Torre: Thaupic hapludands. Presente en cerca de un 80%, presentes en la zona norte rural de Bogotá, en el plano de terraza de planicie fluviolacustre con pendiente de 1-3%, con clima seco frío. Estos suelos se caracterizan por ser

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 9 de 55	




moderadamente profundos, bien drenados, de texturas medias y de fertilidad alta, desarrollados sobre depósitos de cenizas volcánicas.

- Consolidación Suba: Acrudixic Melanudans. Localizada en el Norte de Bogotá, en terraza de paisaje fluviolacustre, con pendiente de 1-7%. A 2580 m, de clima frío seco. Estos suelos se distinguen por ser moderadamente profundos, bien drenados, de texturas medias y de fertilidad alta, desarrollados sobre depósitos de cenizas volcánicas.
- Consolidación Mercedes: Typic melanudans. Localizada en la zona rural del Norte de Bogotá, en plano de terraza, de la terraza interior del paisaje de la planicie fluviolacustre en pendientes de 0-1%, a 258 m, de clima frío seco. Estos suelos se caracterizan por ser moderadamente profundos, bien drenados, de texturas medias y de fertilidad alta, desarrollados sobre depósitos de cenizas volcánicas.

5. JUSTIFICACIÓN

El aumento de CO₂ en la atmósfera ha afectado el equilibrio climático a nivel planetario, implicando una reducción de las reservas de carbono (IPBES 2019; IPCC 2019). En el periodo 2012-2021 se estimó que la deforestación y degradación del suelo implicaron a nivel mundial una emisión promedio de $4,5 \pm 2,6 \text{ GtCO}_2 \text{ año}^{-1}$ (Friedlingstein et al. 2022). Como respuesta a esta situación a nivel mundial se han adoptado diferentes políticas, planes y acciones de conservación, recuperación y restauración (IPCC 2019; Keesstra et al. 2018), siendo el manejo adecuado del suelo fundamental para garantizar las reservas de carbono orgánico del suelo (FAO 2017).



Este carbono orgánico del suelo es fundamental para garantizar la salud del suelo, permitir el soporte de diferentes estratos de vegetación y la producción de alimentos (Alavi-Murillo et al. 2022). Mantener las reservas del carbono orgánico del suelo es esencial para mitigar el cambio climático (FAO 2022); sin embargo, las actividades antrópicas conducen a que este carbono se convierta en fuente neta de gases de efecto invernadero (GEI) (Ahirwal et al. 2021; Yang et al. 2020). De manera que evaluar cómo cambia el carbono orgánico del suelo en diferentes coberturas vegetales permite comprender las dinámicas de producción y pérdida de carbono, que influyen tanto en el secuestro como en la liberación de CO₂ (Walteros Torres et al. 2022; Zúñiga-Escobar et al. 2013).

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <small>Jardín Botánico José Celestino Mutis</small>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ  JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 10 de 55	

Por otro lado, hay una incertidumbre en la estimación de las reservas de carbono orgánico del suelo y los cambios en estas reservas asociada a los métodos, la tecnología, las predicciones, la variabilidad espacial y una serie de variables (Baldock et al. 2012). Esta incertidumbre inherente a las investigaciones de carbono solo puede ser menor en la medida en que se acumule conocimiento local, con estudios a escalas puntuales y en diferentes contextos como por ejemplo los urbano - rurales, considerando que los procesos de captura, almacenamiento de carbono y liberación de CO₂ dependen de condiciones asociadas a prácticas que se dan a escala local (Wu et al. 2014). De ahí que sea prioritario desarrollar investigaciones en estimación del carbono orgánico del suelo a escala local, en un contexto urbano que integre áreas de importancia ecológica con coberturas vegetales en proceso de recuperación y nativas, con la idea de que el suelo nativo tendría el máximo valor posible de las reservas de carbono en el compartimento carbono orgánico del suelo.

Por todo lo anterior, el suelo debe ser gestionado, permitiendo que la materia orgánica que cae y se integra a él, se acumule y se convierta gradualmente en carbono que puede permanecer por largo tiempo en formas estables en períodos de 100 años o más (Global Soil Partnership 2018) y de esta manera mitigar el cambio climático. Para comprender las dinámicas de cambio del carbono orgánico del suelo por la influencia de la cobertura vegetal, uso del suelo y otros factores biofísicos, hay que estimar a escala local la cantidad de carbono orgánico del suelo (FAO 2017). Su cuantificación es punto de partida para orientar acciones que fomenten el proceso en la restauración de coberturas degradadas de la Sabana de Bogotá, equivalentes o comparables con otros suelos propios de este ecosistema.

En este contexto, el desarrollo de esta investigación contribuye al cumplimiento de los objetivos estratégicos del Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, acreditado como Centro de Investigación para la conservación de la flora, incluidos los suelos. Se promueve el fortalecimiento de gestión del conocimiento sobre coberturas vegetales para la mitigación y adaptación al cambio climático. También se cumple el Decreto 607 del 2017 de aprobación de la Política Pública para la Gestión de la Conservación de la Biodiversidad en el Distrito Capital, que contribuye a conservarla biodiversidad para una gestión eficiente de la conservación y mejoramiento de la calidad de vida de los ciudadanos.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 11 de 55	

6. HIPÓTESIS

Se considera que un buen uso y gestión del suelo, asociado a restauración y mantenimiento de las coberturas vegetales, que se han dado durante varios años tanto en el Jardín Botánico como en el área de Las Mercedes ha tenido consecuencias en: i) El almacenamiento de carbono orgánico en el suelo del Jardín Botánico sea cercano a lo presente en áreas en proceso de recuperación del Predio Las Mercedes, esto debido a que en el Jardín Botánico se mantiene una importante diversidad de flora en sus colecciones vivas, que gradualmente ha ido incorporando acciones de conservación y de uso adecuado del suelo.

Por otro lado, entendiendo que las coberturas boscosas tienen una mayor capacidad de fijar carbono por un mejor desarrollo estructural que permite el aporte continuo de hojarasca y materia orgánica al suelo, esperamos que: ii) El almacenamiento de COS será mayor en el Bosque de las Mercedes en comparación con coberturas vegetales de pastizales en proceso de restauración hace 2 y 5 años.

7. OBJETIVOS

7.1. Objetivo General



Estimar el almacenamiento de carbono orgánico del suelo en áreas de importancia ecológica de Bogotá.

7.2. Objetivos Específicos

- Estimar el carbono orgánico del suelo en diferentes coberturas en proceso de recuperación que hacen parte de áreas de importancia ecológica de Bogotá.
- Comparar el almacenamiento de carbono orgánico del suelo entre dos áreas de importancia ecológica: el Jardín Botánico y Las Mercedes.

8. MARCO TEÓRICO

Definición de suelo: el suelo es la capa superior de la corteza terrestre, que evoluciona por la descomposición superficial de las rocas y cuyo nivel de meteorización de las rocas hace

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <small>Jardín Botánico José Celestino Mutis</small>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 12 de 55	

posible la implantación de microorganismos, hongos, plantas y la vida (Gaucher 1971). Su composición comprende: elementos sólidos en esencia minerales u orgánicos, líquidos o soluciones y elementos gaseosos que hacen parte de la atmósfera del suelo.



Componentes del suelo

Como elementos sólidos de esencia mineral u orgánica están: las arenas, los limos y las arcillas: las arenas son fragmentos de rocas o minerales, de tamaños de 2 a 0.05 mm, que representan la fragmentación de la roca madre o provienen de otros lugares por la acción del viento y del agua, pueden tener funciones nutritivas de acuerdo a la composición de los minerales que la componen. En general los suelos arenosos son poco fértiles, sin embargo, su presencia permite la aireación del suelo, poca retención del agua, absorción rápida de la temperatura y disminución de la cohesión de las partículas constituyentes del suelo. Los limos, de tamaños de entre 0.05 y 0.002 mm, son contrario a las arenas, elementos que le aportan impermeabilidad y asfixia al suelo. Por último, las arcillas de tamaños por debajo de 0.002 mm, inferiores a 2 micras, presentan propiedades coloidales, que en presencia de agua se comportan como suspensiones estables. Estas arcillas son una mezcla de minerales de rocas silicatadas que el otorgan propiedades físicas y químicas al suelo. Su presencia impermeabiliza y asfixia al suelo, favorece la adherencia al agua, fomenta la cohesión de las partículas, modera la absorción rápida de la temperatura del suelo, le dan estabilidad a las estructuras del suelo, son el medio de conservación de minerales que nutren a los organismos por el intercambio de bases, intervienen en la formación compleja de dispersión, floculación de migraciones y acumulaciones en el suelo (Gaucher 1971).

Como elementos orgánicos, la materia orgánica y el humus le otorgan características al suelo, que se presenta como una textura celular o fibrosa de materia vegetal que desaparecerá en fracciones más finas a medida que se consolida. El humus permite la permeabilidad al aire y al agua, aumenta la porosidad del suelo, y lo hace más blando y esponjoso. Este humus que es la materia orgánica en fracciones, moviliza y migra los nutrientes, dependiendo del clima, al favorecer la aireación o generando anaerobiosis. La influencia de esta materia orgánica en el suelo es determinante al descomponerla o estabilizarla.

Características básicas del suelo:

Densidad y porosidad del suelo

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 13 de 55	

La densidad real del suelo es constante, mientras que la densidad aparente tiene en cuenta los vacíos entre las partículas, los poros y es el resultado de fenómenos como el agrietamiento y apelmazado. La porosidad es el vacío del suelo y el espacio lagunar, que depende de la estructura del suelo y su actividad biológica. Mientras más grandes sean los elementos del suelo, por ejemplo: las arenas, los vacíos serán mayores. La materia orgánica aumenta la porosidad, y una alta porosidad permite el desarrollo de las raíces (Gaucher 1971).

Dióxido de carbono en el suelo

La atmósfera del suelo varía de acuerdo a la presencia de oxígeno y dióxido de carbono. A medida que aumenta el oxígeno baja la presencia de carbono. En este complejo equilibrio subterráneo, las raíces de las plantas absorben el oxígeno, al igual de la respiración de los microorganismos aeróbicos y la micro fauna, de tal manera que cuando baja la concentración de oxígeno, por ejemplo, por el exceso de humedad, las raíces se asfixian, al igual que toda la actividad aeróbica de la que también dependen las micorrizas (Gaucher 1971).

Acidez en escala de pH




El pH también cumple un papel en el suelo. Un pH de entre 5,5 y 6 mantiene una elevada concentración de CO₂ libre, mientras que un pH alcalino de 7,5 y 8 favorece la fijación del CO₂ en estado combinado y disuelto (Gaucher 1971).

Humedad

La humedad del suelo afecta los microorganismos, al ser muy alta limita la aireación y genera anaerobiosis. Junto con una temperatura optima la humedad fomenta un aumento de la temperatura del suelo. En ambientes cálidos y húmedos la humidificación es mucho mayor en comparación a climas fríos (Gaucher 1971).

Materia Orgánica del suelo

La materia orgánica en el suelo está compuesta principalmente del humus que se transforma y mineraliza constantemente. La mineralización es un proceso microbiológico mediante el cual la materia y los compuestos orgánicos se transforman en inorgánicos para ser usados y absorbidos por las plantas; mientras que el humus se resiste a la acción de los microorganismos y se acumula en el suelo a lo largo del tiempo (Cely Reyes et al.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <small>Jardín Botánico José Celestino Mutis</small>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ  JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 14 de 55	



2016). De tal manera que en el suelo ocurren dos fenómenos que lo sostienen en el tiempo: la humificación -o acumulación de materia orgánica- y la mineralización –presencia de sustancias disponibles para uso de las plantas orgánicas y minerales. Dicho de otro modo, la materia orgánica en el suelo tiene dos formas de evolucionar y transformarse: destruirse parcialmente y acumularse o mineralizarse.

Variación del carbono orgánico del suelo

El suelo es el depósito final de la masa que compone las plantas (Aguirre Forero, Piraneque Gambasica, y Mercado Fernández 2022). El carbono se incorpora en el suelo como COS a través del aporte de material vegetal y hojarasca en diferentes grados de descomposición (Vitousek 1984). Así, la materia orgánica puede constituir carbono lábil y carbono estable, que puede permanecer por mucho tiempo, debido a que su tasa de liberación de CO₂ es más baja en comparación con el carbono almacenado (Lal 2017). Esta materia orgánica lábil y estable puede tomar tres caminos; primero: la humificación que estabiliza la materia orgánica en sustancias diversas denominadas humus; segundo: la preservación selectiva de la materia orgánica que se mantiene estable por largos periodos de tiempo, y, tercero: la descomposición progresiva que es inestable, que permite el acceso de los microorganismos donde ocurren los fenómenos de respiración del suelo, de mineralización y se forman complejos arcillo húmicos. No obstante, la complejidad de este proceso aun presenta grandes incógnitas para las ciencias del suelo (Aguirre Forero et al. 2022)

El almacenamiento de COS exhibe una amplia variación espacial y temporal en función de las condiciones edáficas, climáticas, uso del suelo y tipo de vegetación (FAO 2017). En coberturas transformadas de pastizales y cultivos con labranza de uso se ha reportado una disminución de COS (Carvajal et al. 2009). Además, los factores edafoclimáticos como la temperatura y humedad del suelo influyen sobre la acumulación de COS (Lal 2017). En ecosistemas de alta montaña donde la temperatura del suelo es baja se suele presentar un mayor almacenamiento de COS (Carvajal et al. 2009; Castañeda-Martín y Montes-Pulido 2017a). Esto se atribuye a que en latitudes altas la materia orgánica exhibe menor descomposición por actividad microbiana lenta que favorece la acumulación de materia orgánica por largos periodos de tiempo (Castañeda-Martín y Montes-Pulido 2017a; Peña-Quemba 2015).

Por otro lado, en el estudio del suelo, en particular el estudio del componente orgánico se ha encontrado que la intervención humana en el suelo puede generar pérdidas o ganancias en el COS (Aguirre Forero et al. 2022). En los monocultivos disminuyen las reservas de COS debido a que los procesos biológicos, en especial los asociados a la mineralización



 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <small>Jardín Botánico José Celestino Mutis</small>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 15 de 55	

interfieren con la formación de COS de naturaleza estable y por lo tanto se pierden las reservas de carbono en el suelo a largo plazo. En complemento a este fenómeno de pérdidas de carbono, en suelos cubiertos de vegetación como pastos y rastrojos, ocurre lo contrario, ya que la vegetación actúa como cubierta protectora que permite la acumulación de COS, disminuyendo la acción de la mineralización y las pérdidas de COS (Aguirre Forero et al. 2022; Paustian et al. 2019; Zomer et al. 2017). Por estas razones la FAO recomienda que en prácticas agrícolas se fomente el suelo cubierto, evitando prácticas de labrando excesiva y plateo para evitar la pérdida de COS.

Almacenamiento de COS y cambio climático

El balance entre almacenamiento de COS y emisión de CO₂ del suelo a la atmosfera ha sido alterado por las variaciones climáticas y de cambio de uso del suelo (IPBES 2019; IPCC 2019). Particularmente, en zonas tropicales se han presentado fuertes variaciones climáticas, que sumadas a la deforestación, la erosión y a la labranza han implicado un incremento de las emisiones de CO₂ derivadas de la respiración del suelo (Lei et al. 2021; Paustian et al, 2019). En la última década se estimó que el cambio de uso del suelo generó a nivel global una emisión promedio de $4,5 \pm 2,6$ Gt CO₂ año⁻¹ (Friedlingstein et al. 2022). Este cambio de uso del suelo de ecosistemas nativos a agricultura, que se da por la labranza para facilitar las labores agrícolas es una de las mayores causas de disminución de COS, porque disminuye el tamaño de las partículas y los agregados (Martínez, Fuentes, y Acevedo 2008)

El COS tiene un rol fundamental en las estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático (FAO 2017). Las acciones de mitigación del cambio climático involucran un aumento del almacenamiento de COS y reducción neta de las emisiones de GEI en un tiempo definido (FAO 2017; García Portilla 2003). De ahí que a nivel mundial se han adoptado políticas, planes y acciones de conservación, recuperación y restauración del suelo (IPCC 2019; Keesstra et al. 2018). Diversos estudios han documentado el impacto del cambio climático sobre los stocks de carbono y flujos de CO₂ (Yang et al. 2020). Así, es necesario avanzar en el seguimiento a escala local en diferentes contextos urbanos y rurales de los flujos de carbono en el suelo para obtener estimaciones realistas de la respuesta de los ecosistemas a los impactos del cambio climático (Jandl y Rodeghiero 2018).

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <small>Jardín Botánico José Celestino Mutis</small>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 16 de 55	

COS en coberturas naturales y urbanas

Entre las pérdidas y ganancia en el COS, las coberturas naturales presentan ganancias de carbono orgánico de suelo; por lo contrario, las coberturas antrópicas tienen pérdidas (Castillo-Pacheco et al. 2016). De acuerdo con el Mapa Global de Carbono Orgánico del Suelo (Global Soil Partnership 2018) este valor puede variar de 0 a 90 t ha; siendo cero el valor del COS en desiertos y zonas muy áridas, y más de 90 en áreas húmedas de tundra, bosques boreales, bosques de montaña y alta montaña, tierras altas (FAO 2022).

En contextos urbanos son pocas las investigaciones relacionadas con los flujos de carbono orgánico del suelo (Saavedra-Romero et al. 2020; Schindelbeck et al. 2008). Allí dependiendo del nivel de impacto, los suelos tienen a presentar baja fertilidad, alta heterogeneidad, estructura compacta, pH tendientes a la alcalinidad, baja difusión de oxígeno, regímenes de temperatura y humedad alterados y, variaciones altas en la cantidad de biomasa microbiana en las capas superiores del suelo (Hagan et al. 2012). Se destacan estudios realizados en bosques urbanos de Ciudad de México (Saavedra-Romero et al. 2020) y suelos urbanos de Estados Unidos (Hagan et al. 2012). Además, a partir de la recuperación de terrenos urbanos degradados mediante la re vegetalización y el reciclaje de residuos industriales y urbanos se han logrado secuestrar GEI en los sumideros de carbono en suelo de las ciudades (Weissert et al. 2014).

Unido a lo anterior, e invocando la complejidad de los procesos que ocurren en el suelo, que aún no han sido comprendidos en su totalidad, nos parece importante indicar que de acuerdo con Aguirre Foreo et al. (2020), en condiciones naturales, tan solo un 1% del carbono que entra al suelo, es humidificada, se mantiene de forma estable, y es la matriz de la gran reserva de carbono secuestra el suelo.

9. METODOLOGÍA

9.1. Definición de la población de estudio y muestra

Con el fin de estimar el carbono orgánico del suelo en áreas de importancia ecológica en Bogotá, se incluyeron el Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis y el Predio de Las Mercedes de la Reserva Forestal Thomas van der Hammen, como sitios estratégicos de la ciudad. En total se establecieron 32 puntos de muestreo de suelos en el año 2024 (9 en el JBB y 23 en el predio Las Mercedes). En el JBB se incluyeron 21 unidades de colecciones

vegetación y presencia de epifitas. Allí se han realizado acciones de enriquecimiento y manejo de especies invasoras desde el año 2012 (Azula 2021). El área 2 correspondió a un área circundante al bosque, que presentó árboles, arbustos y pastizales. Allí se han realizado acciones de restauración desde hace más de ocho años (desde el año 2015 al 2019). Por último, el área 3 comprendió una cobertura de pastizales mixtos con escasa presencia de arbustos y árboles, en donde el Jardín Botánico ha realizado plantación de especies nativas en los dos últimos años. En el área 1 de bosque se establecieron 9 puntos de muestreo, mientras en las áreas 2 y 3 en proceso de recuperación se establecieron 7 puntos, para un total de 23 puntos de muestreo de suelo en el predio Las Mercedes (Figura 2).

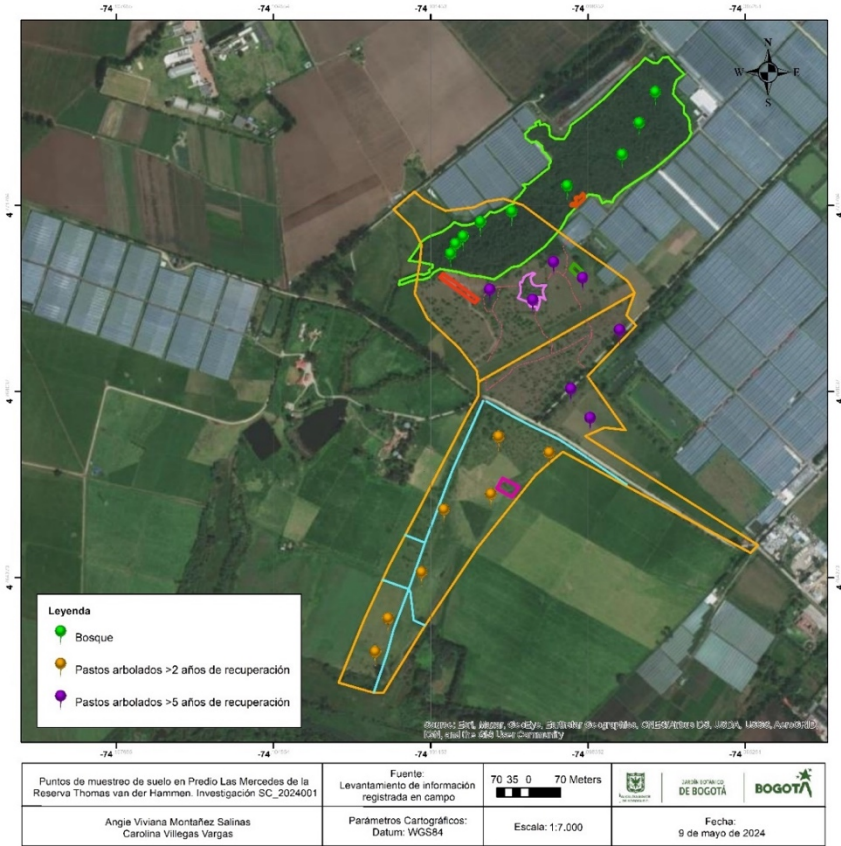




Figura 2. Puntos de muestreo establecidos en el Predio Las Mercedes de la Reserva Thomas van der Hammen.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <small>Jardín Botánico José Celestino Mutis</small>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 19 de 55	

9.2. Métodos



El muestreo de suelos se realizó siguiendo la metodología propuesta en el Inventario Forestal Nacional (IDEAM 2018) con algunos ajustes para el área de estudio. Se definió el establecimiento total 32 puntos de muestreo de suelo (9 adicionales en el JBB y 23 en el predio Las Mercedes) considerando una distancia mínima de separación de 50 m entre puntos y suficiente representación en cada unidad de estudio.

Debido a que no se contó con el análisis certificado de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, para el tiempo de vigencia de este contrato por cuestiones ajenas a la voluntad de las investigadoras, las muestras tomadas durante el año 2024 fueron analizadas en los laboratorios de la Subdirección Científica, incluyendo las siguientes propiedades: pH, densidad aparente, porcentaje de materia orgánica, porcentaje de carbono orgánico y carbono total. Adicionalmente, en el laboratorio de suelos de la Universidad Distrital se hizo el análisis de textura del suelo por el método de Bouyoucos.

Las muestras para análisis de carbono orgánico del suelo y otras propiedades del suelo fueron colectadas en los primeros 30 cm del suelo, siendo este horizonte donde se concentra la mayor parte de la materia orgánica, gracias al aporte y acumulación de hojarasca (Hoyle 2013). Para la extracción de estas muestras se empleó una paladraga y en algunos casos se usó el azadón para remover la capa vegetal sobre el suelo (Fotografía 1.1. A, B). Las muestras para densidad aparente se colectaron también en los primeros 30 cm del suelo, con ayuda de un cilindro metálico de volumen conocido, siguiendo el método del cilindro (Forsythe, 1985), (Fotografía 1.1. C). Estas muestras fueron secadas en el laboratorio a una temperatura de 105°C durante 48 horas, para luego determinar el peso seco en una balanza de precisión y aplicar la siguiente fórmula:

$$Da = \frac{P_{ss}}{V_c}$$

Donde Da es la densidad aparente expresada en g cm³, Pss es el peso de suelo seco en g y Vc es el volumen de cilindro (cm³).

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 20 de 55	





Fotografía 1. Colecta de muestras de suelo con paladraga (A), uso de azadón (B) y extracción de muestras para densidad aparente con cilindro metálico (C).

Para la medición del pH se siguió el método del potenciométrico, de manera que las muestras de suelo fueron tamizadas en un tamiz de 2mm y disueltas en agua destilada bajo una relación 1:1 para posteriormente introducir el electrodo y obtener la medición con un pH metro marca Apera (2. A).

En cuanto al carbono orgánico (CO%) se siguió el método de calcinación, que permite estimar el contenido de materia orgánica (MO) mediante la pérdida de peso de una muestra de suelo sometida a altas temperaturas (Eyherabide et al. 2014; Schulte y Hopkins 1996). Para esto se pesaron 5 g de muestra en crisoles de porcelana y luego se colocaron en una estufa durante 24 h a 105°C para obtener el peso inicial en una balanza analítica GR-200 de precisión 0.0001. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en una mufla a 300°C durante 2 h, enfriadas y pesadas nuevamente (Fotografía 2. B, C). El cálculo de materia orgánica (MO) se realizó por la diferencia de peso inicial y final y asumiendo que la MO contiene un 58% de CO, se utilizó el factor de conversión de 1,724 para obtener el CO% (Hoyle 2013). El carbono orgánico del suelo en $t\ ha^{-1}$ se obtuvo a partir del porcentaje de carbono orgánico (CO%), la densidad aparente (D_a) y el espesor del suelo (E), aplicando la siguiente formula (IPCC 2003):

$$t\ C\ ha^{-1} = CO * DA * E * 10.000$$



 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 21 de 55	

Donde $t\ C\ ha^{-1}$ es el almacenamiento de carbono, CO en %, DA es la densidad aparente ($t\ m^{-3}$), E es la profundidad del suelo (m). El resultado se multiplica por 10.000 para expresarlo en hectáreas.



Fotografía 2. Procesamiento de muestras en el laboratorio para obtención de pH del suelo (A). Muestras dispuestas en crisoles (B) y muestras en mufla para determinación de carbono orgánico del suelo.

El análisis de textura del suelo en cuanto al porcentaje de arenas limos y arcillas, fue realizado por la estudiante de pasantía Luisa Fernanda Álvarez López, de la carrera de Ingeniería Forestal de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en los laboratorios de la universidad. Para esto se siguió el método de Bouyoucos: primero se pesaron 50 gr de suelo tamizado (2mm) (Fotografía 3, A), se le agregó 10 ml de agente dispersante en el vaso de la batidora junto con la muestra de suelo pesada, se agregó 200 ml de agua de la llave al vaso de la batidora y se agitó durante 10 minutos (Fotografía 3, B). Con el vaso lavador, se pasó el contenido del vaso de la batidora a la probeta de 1000 ml, se llevó la probeta a 1000 ml con agua destilada (Fotografía 3, C), se agitó el contenido de la probeta de forma vertical con el agitador de rodaja de doce a quince veces. Después de agitar, se contaron 40 segundos y se introdujo simultáneamente el hidrómetro, luego, se realizó la lectura una vez pasado el tiempo y se anotó como L1, al mismo tiempo, luego de introducir el termómetro y de registrar la temperatura como T1 (Fotografía 4). Esta lectura se realizó en la escala del hidrómetro con la vista nivelada al borde superior del contenido. Luego se dejó la muestra en absoluto reposo durante 2 horas. Transcurrido el tiempo, se introdujo el hidrómetro sin perturbar la muestra y se tomó la segunda lectura. De forma simultánea se




 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 22 de 55	

debe introducir el termómetro. Se registraron las lecturas como L2 y T2 (Sánchez et al. 2006; Universidad Distrital Francisco José de Caldas 2017).



Fotografía 3. Procedimiento para el análisis de textura del suelo (A). pesaje de las muestras (B), separación de las diferentes texturas en la batidora (C). disposición de las probetas para el llenado con agua destilada y posterior agitación.

El agente dispersante correspondió a 37,5 g de hexametáfosfato de sodio R.A (NaPO_3)₆ y 7,94g de carbonato de sodio R.A, disueltos en 600 ml de agua destilada y llevados a volumen de un litro con agua destilada. Las batidoras usadas fueron las siguientes: una de un puesto y otra de 3. Cada muestra se dejó durante 10 minutos con cronómetro. Se agregó la muestra a las probetas y luego se llevaron a 1000 mL con agua destilada (Fotografía 3 A).

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ  JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 23 de 55	





Fotografía 4. Registro de temperatura con termómetro

9.3. Análisis de la información

Para evaluar las diferencias entre las coberturas del Predio Las Mercedes y el JBB se realizaron análisis de varianza (Anova) y/o Kruskal-Wallis según el comportamiento de los datos. Posteriormente se aplicaron pruebas de comparación múltiple de medias (Tukey y/o Wilcoxon). Además, se hizo un análisis clúster con el método de Ward y la distancia euclídea para determinar posibles agrupaciones de los suelos del JBB en función de las propiedades fisicoquímicas del suelo. A partir de los grupos identificados se realizaron pruebas de varianza y de comparación múltiple de medias según la normalidad de los datos. Finalmente, para analizar la relación entre el COS y otras propiedades del suelo se emplearon correlaciones de Pearson o Spearman y se hizo un análisis de regresión para evaluar la relación entre las propiedades del suelo (textura, pH, densidad aparente) con el almacenamiento de COS.

10. RESULTADOS

En el año 2024 se colectaron un total de 64 muestras (32 para análisis de COS y 32 para densidad aparente - DA). En el JBB se colectaron 18 muestras en colecciones vivas del JBB (9 para COS y 9 para DA) y 46 en la Reserva Las Mercedes (23 para COS y 23 para DA). En el JBB las muestras fueron colectadas en las unidades de ambiente subxerofítico (ASX), colección de árboles exóticos (CAE), bosque andino con énfasis en gaques (BAG), bosque andino con énfasis en robles (BAR), bosque andino con énfasis en quinas (BAQ), bosque andino con énfasis en magnolias (BAM), colección de Melastomataceae (CME),



 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <small>Jardín Botánico José Celestino Mutis</small>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 24 de 55	

páramo (PAR) y bosque de niebla (BNB) (Fotografía 5).



Fotografía 5. Colección de árboles exóticos (A), colección de Melastomataceae (B) y hojarasca sobre el suelo en Bosque andino con énfasis en robles (C). Colecciones vivas del JBB

En el Bosque de Las Mercedes se colectaron 9 muestras en el área de bosque conservado, 7 muestras en pastizales en proceso de recuperación de más de 2 años y 7 muestras de pastos arbolados de más de 5 años de recuperación (Fotografía 6).

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 25 de 55	





Fotografía 6. Bosque conservado (A), Pastos arbolados en proceso de recuperación de más de 5 años (B) y pastizales en recuperación de más de 2 años (C) en predio Las Mercedes de la Reserva Thomas van der Hammen.

10.1 Carbono orgánico del suelo y otras propiedades fisicoquímicas en áreas de importancia ecológica de Bogotá

El almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS), concentración de carbono %, materia orgánica %, pH del suelo, arena %, limo % y arcilla % cambiaron entre sitios de estudio ($p < 0.05$). Mientras, la densidad aparente fue la única variable que no cambio entre sitios ($p > 0.05$) (Tabla 1).

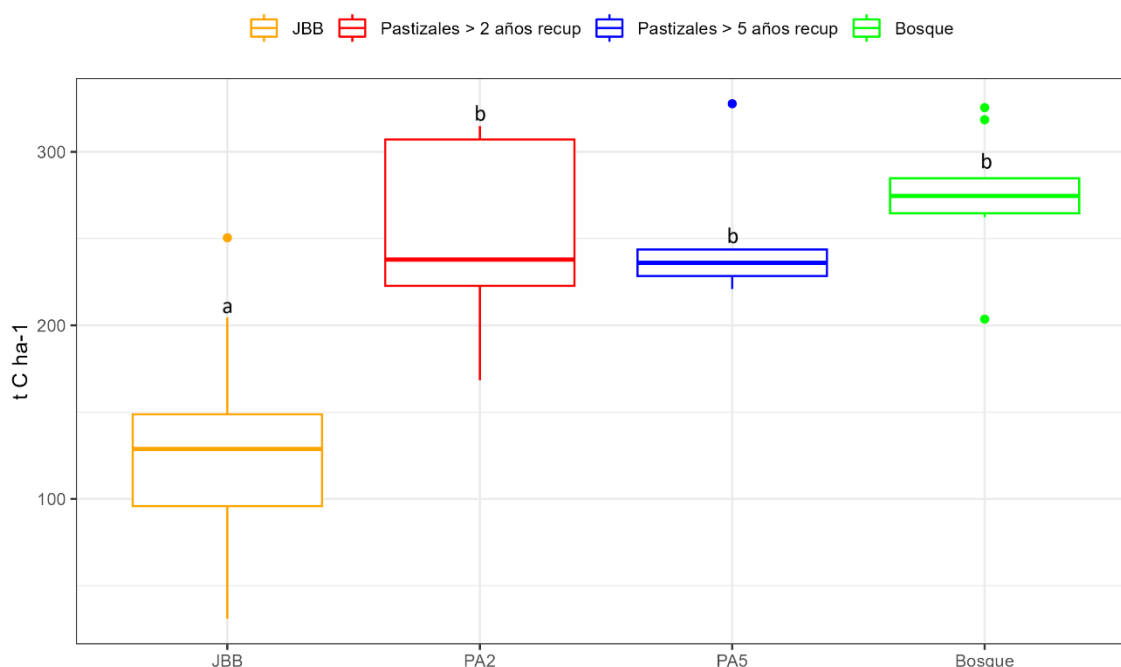
Tabla 1. Valores promedio y desviación estándar del almacenamiento de carbono y las propiedades fisicoquímicas del suelo en el Jardín Botánico y el predio Las Mercedes, que incluye pastizales en recuperación > 2 y > 5 años. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Sitio	Jardín Botánico	Pastizales en recuperación > 2 años	Pastizales en recuperación > 5 años	Bosque
CO (t ha ⁻¹)	126.34 ± 44.35 ^a	254.41 ± 56.87 ^b	248.81 ± 39.66 ^b	276.01 ± 35.45 ^b
CO %	6.11 ± 2.25 ^a	14.67 ± 2.36 ^b	14.25 ± 1.82 ^b	15.55 ± 2.85 ^b
MO %	10.54 ± 3.89 ^a	25.29 ± 4.07 ^b	24.56 ± 3.14 ^b	26.82 ± 4.91 ^b
Da g cm ³	0.71 ± 0.14	0.58 ± 0.08	0.66 ± 0.18	0.6 ± 0.06
pH	5.76 ± 0.55 ^a	5.61 ± 0.57 ^{ab}	5.06 ± 0.19 ^b	4.69 ± 0.45 ^{bc}

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 26 de 55	



Arena %	47.23 ± 13.09 ^a	61.79 ± 8.38 ^b	63.14 ± 4.29 ^b	66.66 ± 7.31 ^b
Limo %	36.62 ± 9.44 ^a	30.22 ± 5.63	30.03 ± 4.94	25.18 ± 5.51 ^b
Arcilla %	16.16 ± 8.26 ^a	7.99 ± 3.82 ^b	6.83 ± 0.98 ^b	8.16 ± 3.41 ^b

El almacenamiento de carbono orgánico del suelo (t ha^{-1}) fue superior en el predio Las Mercedes en comparación con el Jardín Botánico ($126.34 \pm 44.35 \text{ t ha}^{-1}$) (Anova, $F_{3,61} = 41.77$, $p < 0.001$). En Las Mercedes no se presentó variación entre las áreas de estudio ($p > 0.05$); sin embargo, el COS promedio fue más alto en bosque ($276.01 \pm 35.48 \text{ t ha}^{-1}$), seguido de pastizales > 2 años de recuperación ($248.81 \pm 39.66 \text{ t ha}^{-1}$) y finalmente pastizales > 5 años de recuperación ($254.41 \pm 56.87 \text{ t ha}^{-1}$) (Gráfica 1).

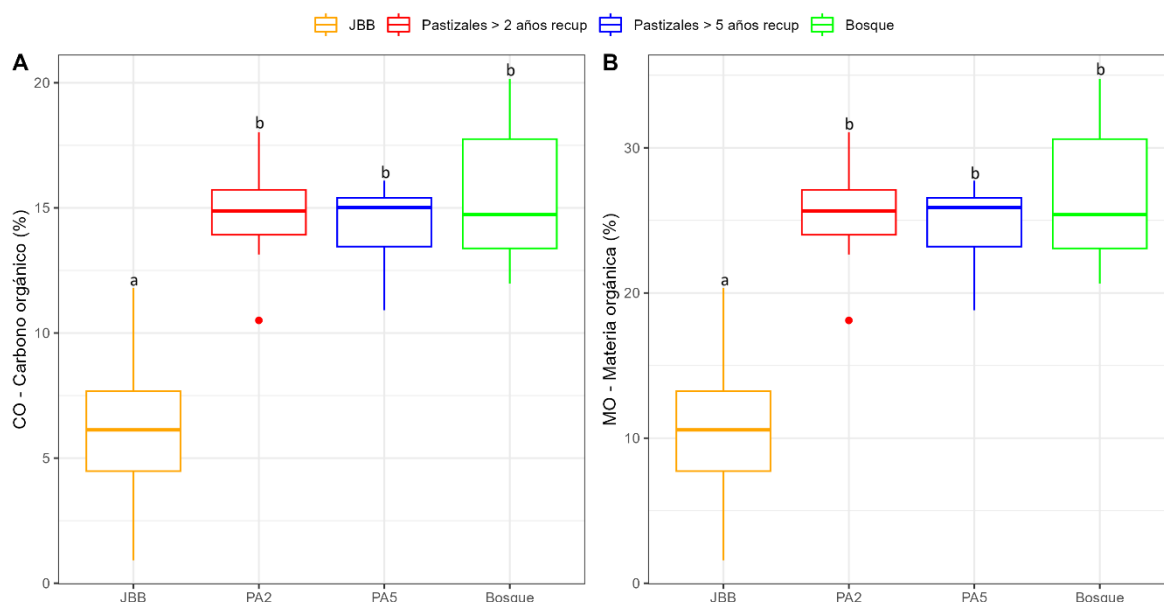


Gráfica 1. Diagrama de cajas de almacenamiento de carbono orgánico del suelo (t ha^{-1}) en el Jardín Botánico de Bogotá y el predio Las Mercedes, que comprende las áreas de pastizales > 2 años de recuperación, pastizales > 5 años de recuperación y bosque. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

La concentración de carbono orgánico (CO%) y la materia orgánica (MO%) del suelo siguieron la misma tendencia que el almacenamiento de carbono, con un valor promedio de más del doble en Las Mercedes con respecto al Jardín Botánico ($6.11 \pm 2.25\%$; $10.54 \pm 3.89\%$) ($p < 0.001$). En Las Mercedes se forma un grupo homogéneo sin diferencias entre




 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 27 de 55	

las tres áreas de estudio ($p > 0.05$); no obstante, los valores promedio de CO% y MO% tienden a ser superiores en el bosque ($15.55 \pm 2.85\%$; $26.82 \pm 4.91\%$), seguido de pastizales > 2 años de recuperación ($14.67 \pm 2.36\%$; $25.29 \pm 4.07\%$) y pastizales > 5 años de recuperación ($14.25 \pm 1.82\%$; $24.56 \pm 3.14\%$) (Gráfica 2).



Gráfica 2. Diagrama de cajas de carbono orgánico del suelo (CO%) y materia orgánica (MO%) en el Jardín Botánico de Bogotá y el predio Las Mercedes, que comprende las áreas de pastizales > 2 años de recuperación, pastizales > 5 años de recuperación y bosque. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Se esperaba que, en el área del bosque, que está cubierta de hojarasca (Fotografía 76. A) el carbono fuera superior en comparación a las áreas restauradas de más de 2 y 5 años que están cubiertas por pastos (Fotografía 76. B, C), sin embargo, los valores son similares a pesar de las diferencias en las coberturas del suelo.

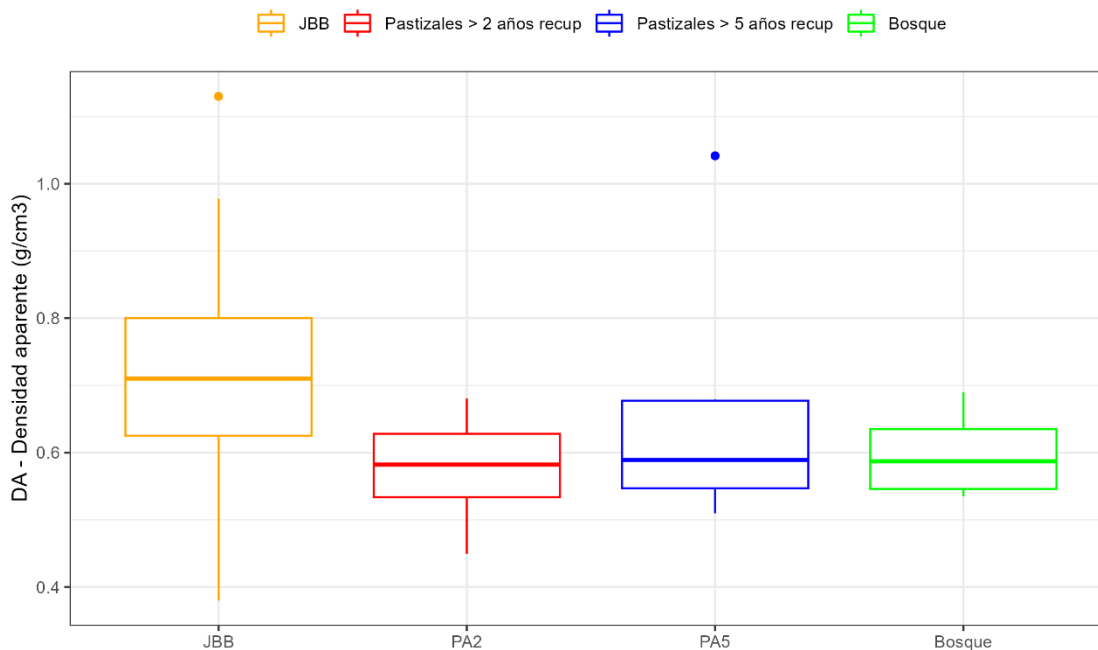
 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ  JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 28 de 55	



Fotografía 7. Cubierta de suelo en el predio de Las Mercedes. Hojarasca sobre el suelo en el bosque (A). Cobertura de pastos en áreas de recuperación de 5 años (B) y cobertura de pastos en áreas de recuperación de 2 años (C).

Densidad aparente



La densidad aparente no cambio significativamente entre el Jardín Botánico y las tres áreas del predio Las Mercedes ($p > 0.05$), aunque en el Jardín Botánico el valor promedio tiende a ser mayor ($0.72 \pm 0.14 \text{ g cm}^{-3}$), seguido de pastos en proceso de recuperación de 5 años ($0.66 \pm 0.18 \text{ g cm}^{-3}$), bosque ($0.6 \pm 0.06 \text{ g cm}^{-3}$) y finalmente, pastos en recuperación de 2 años ($0.58 \pm 0.08 \text{ g cm}^{-3}$) (Gráfica 3).

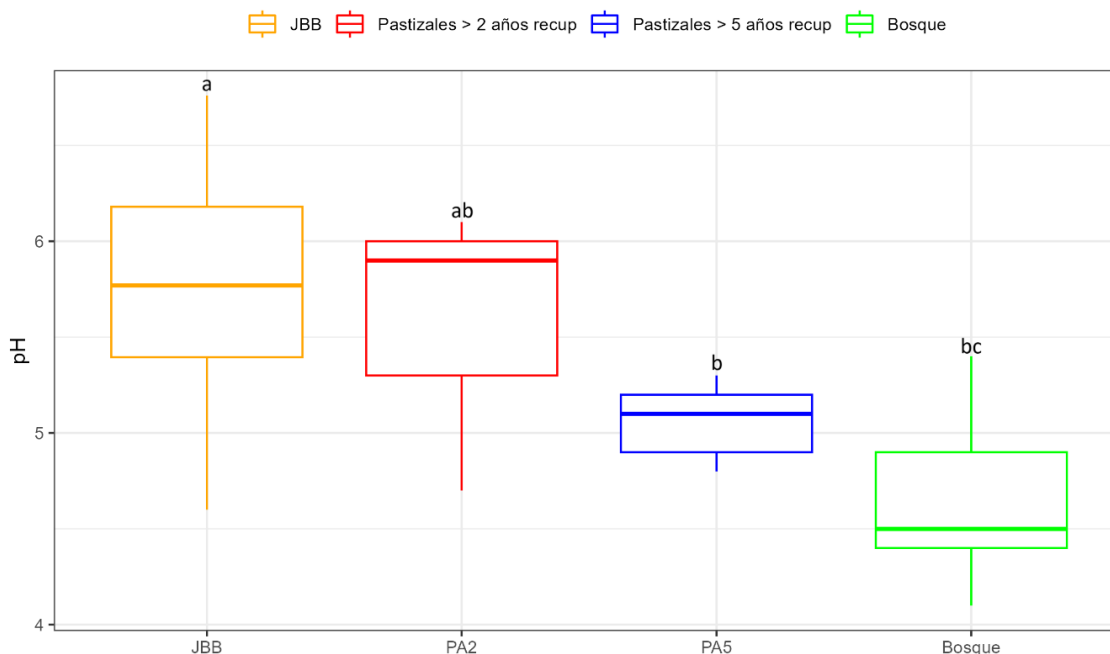


Gráfica 3. Diagrama de cajas de densidad aparente (g/cm³) en el Jardín Botánico de Bogotá y el predio Las Mercedes, que comprende las áreas de pastizales > 2 años de recuperación, pastizales > 5 años de recuperación y bosque. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Grado de acidez del suelo en escala de pH

El pH promedio del suelo fue más bajo en las áreas de bosque (4.69 ± 0.45) y pastos en proceso de recuperación de 5 años (5.06 ± 0.2) en comparación con pastos en proceso de recuperación de 2 años (5.61 ± 0.57) y el Jardín Botánico (5.76 ± 0.55) (Anova, $F_{3,62} = 12.72$, $p < 0.05$) (Gráfica 4). El bosque exhibió los suelos más ácidos, con un valor promedio inferior a 5, que ha sido definido como muy fuertemente ácido (Instituto Geográfico Agustín Codazzi 2005); mientras los suelos menos ácidos corresponden al JBB, que clasifican como fuertemente ácidos.



 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 30 de 55	

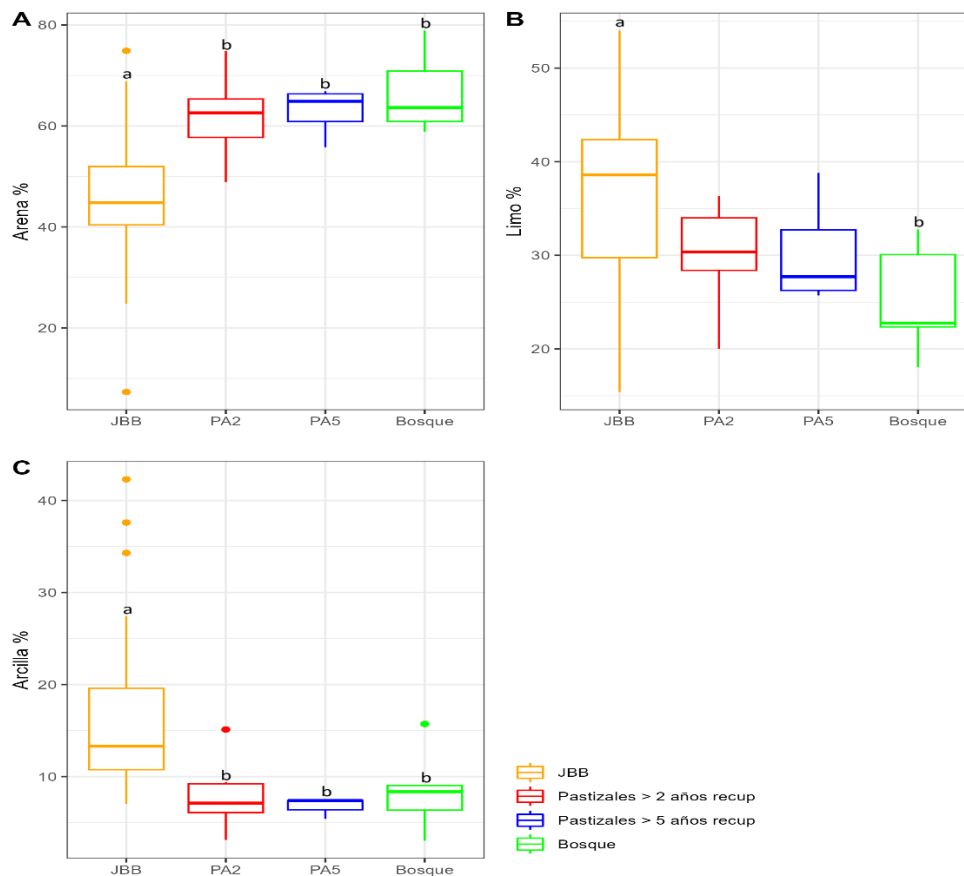


Gráfica 4. Diagrama de cajas de pH del suelo en el Jardín Botánico de Bogotá y el predio Las Mercedes, que comprende las áreas de pastizales > 2 años de recuperación, pastizales > 5 años de recuperación y bosque. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Textura del suelo

El contenido de arena % promedio fue inferior en el Jardín Botánico (47.23 ± 13.09 %) en comparación con los tres sitios del predio Las Mercedes (KW, $\chi^2(3) = 22.76$, $p < 0.001$) (Gráfica 5. A). Asimismo, no se presentaron diferencias entre bosque (66.66 ± 7.31 %), pastizales > 2 años de recuperación (61.79 ± 8.38 %) y pastizales > 5 años de recuperación (63.14 ± 4.29 %) ($p > 0.05$). De forma contraria, el contenido de limo % y arcilla % exhibieron valores más altos en el Jardín Botánico (36.62 ± 9.44 %; 16.16 ± 8.26 %) ($p < 0.05$); sin embargo, el limo fue superior únicamente con respecto al bosque (25.18 ± 5.51 %) (Anova, $F_{3,62} = 5.72$, $p < 0.001$) (Gráfica 5. B), pero no significativamente diferente de pastizales > 2 años (30.22 ± 5.63 %) y > 5 años de recuperación (30.03 ± 4.94 %). Por su parte, el contenido de arcilla si fue superior en comparación con pastizales > 2 años (7.99 ± 3.82 %), > 5 años de recuperación (6.83 ± 0.98 %) y el bosque (8.16 ± 3.41 %) (Anova, $F_{3,62} = 7.32$, $p < 0.001$) (Gráfica 5. C).

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 31 de 55	





Gráfica 5. Diagrama de cajas de arena %, limo % y arcilla % en el Jardín Botánico de Bogotá y el predio Las Mercedes, que comprende las áreas de pastizales > 2 años de recuperación, pastizales > 5 años de recuperación y bosque. Letras distintas indican diferencias significativas ($p<0.05$).

Conformación de grupos en el JBB

Las propiedades fisicoquímicas del suelo (pH, densidad aparente, materia orgánica, textura, carbono % y almacenamiento de carbono - $t\ ha^{-1}$) permitieron la conformación de 3 grupos que comparten características del suelo al interior del Jardín Botánico (Gráfica 66). A continuación, se describen las unidades de colecciones vivas incluidas en los 3 grupos:

Grupo 1.

Este grupo se encuentra conformado por los suelos del JBB que comprenden las unidades de Colección de Labiadas (CLB), Bosque Subandino "Mora Osejo" (BSM), Colección de Melastomátaceas (CME), Bosque de Niebla (BNB), Bosque Andino con énfasis en Gaques

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 32 de 55	

(BAG), Bosque Andino con énfasis en Quinas (BAQ) y Arboretum (ARB). En comparación con los otros grupos, este grupo se caracteriza por presentar mayores valores de almacenamiento de CO ($147.52 \pm 27.41 \text{ t ha}^{-1}$), MO% (13.76 ± 1.9), CO% (7.9 ± 1.15) y limo % (40.62 ± 8.17), valores más bajos de densidad aparente ($0.62 \pm 0.1 \text{ g cm}^{-3}$) y pH (5.37 ± 0.29). Asimismo, presenta valores intermedios de arena % (46.2 ± 7.15) y arcilla % (13.24 ± 2.52).

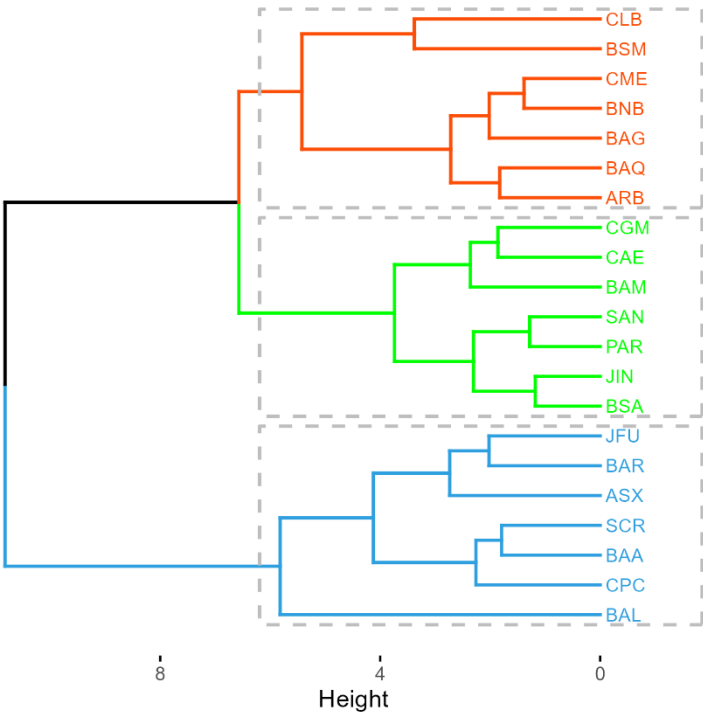
Grupo 2.

El grupo 2 lo conforman los suelos de las colecciones vivas de Colección de Gimnospermas (CGM), Colección de Árboles exóticos (CAE), Bosque Andino con énfasis en Magnolias (BAM), Sistemático de Angiospermas (SAN), Páramo (PAR), Jardín Introductorio (JIN) y Bosque Subandino (BSA). Se caracteriza por valores intermedios de almacenamiento de CO ($134.29 \pm 21.91 \text{ t ha}^{-1}$), MO% (10.54 ± 1.22), CO% (6.17 ± 0.71), densidad aparente ($0.73 \pm 0.07 \text{ g cm}^{-3}$), pH (5.97 ± 0.22) y limo % (35.37 ± 5.62); valores superiores en arena % (52.82 ± 6.21) e inferiores de arcilla % (11.81 ± 3.12).

Grupo 3.

Finalmente, al grupo 3 lo conforman los suelos de las colecciones vivas de Jardín del Fundador (JFU), Bosque Andino con énfasis en Robles (BAR), Ambiente subxerofítico (ASX), Sistemático de Criptógamas (SCR), Bosque alto andino (BAA), Colección de Pino Colombiano (CPC) y Bosque Andino con énfasis en Lauráceas (BAL). Este grupo exhibió los valores más bajos de almacenamiento de carbono ($90.22 \pm 23.3 \text{ t ha}^{-1}$), MO% (6.65 ± 1.53), CO% (3.86 ± 0.89) y arena % (40.39 ± 12.27) en comparación con los otros grupos. Mientras, la densidad aparente ($0.79 \pm 0.11 \text{ g cm}^{-3}$), pH (6.01 ± 0.37) y contenido de arcilla % (23.9 ± 8.19) fueron superiores. Por su parte el contenido de limos % fue intermedio (35.71 ± 5.47)

Colecciones vivas JBB - 2024



Gráfica 6. Análisis Clúster de los suelos de las colecciones vivas del JBB. Datos del 2023 consolidados con 9 puntos adicionales de muestreo del 2024. Sitios: Páramo (PAR), Ambiente subxerofítico (ASX), Bosque de Niebla (BNB), Bosque alto andino (BAA), Bosque Andino con énfasis en Gaques (BAG), Bosque Andino con énfasis en Lauráceas (BAL), Bosque Andino con énfasis en Magnolias (BAM), Bosque Andino con énfasis en Quinas (BAQ), Bosque Andino con énfasis en Robles (BAR), Bosque Subandino (BSA), Bosque Subandino "Mora Osejo" (BSM), Sistemático de Angiospermas (SAN), Sistemático de Criptógamas (SCR), Colección de Árboles exóticos (CAE), Colección de Gimnospermas (CGM), Colección de Labiadas (CLB), Colección de Melastomatáceas (CME), Colección de Pino Colombiano (CPC), Arboretum (ARB), Jardín del Fundador (JFU), Jardín Introductorio (JIN).

Adicionalmente, se encontraron diferencias significativas entre los grupos conformados de colecciones vivas. Para las propiedades que exhibieron una distribución normal (arena %, pH, densidad aparente, materia orgánica %, carbono orgánico % y almacenamiento de carbono – t ha⁻¹) se hizo un ANOVA, mientras que para la variable de arcilla % se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis. Por su parte, el contenido de limo % fue la única variable que no exhibió diferencias entre los grupos (p>0.05) (Gráfica 7).



ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
AMBIENTE
Jardín Botánico José Celestino Mutis

MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS

GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación

Código:
GEN.PR.03.F.03

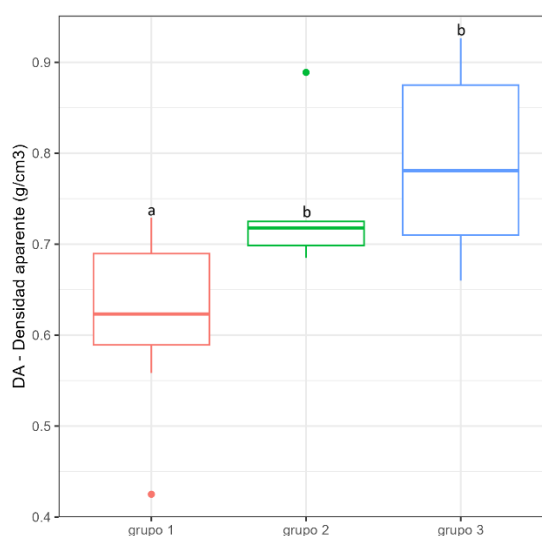
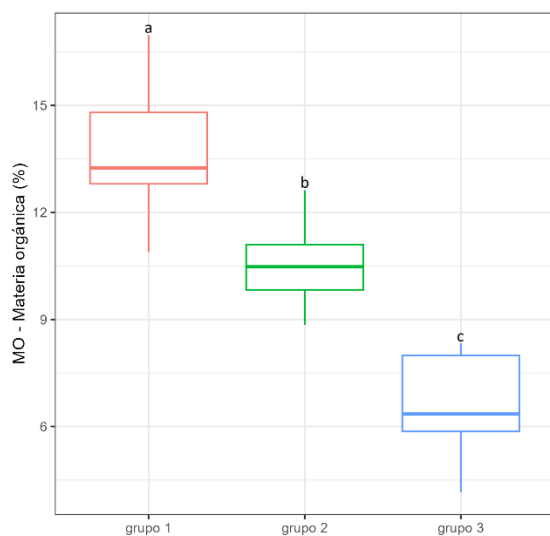
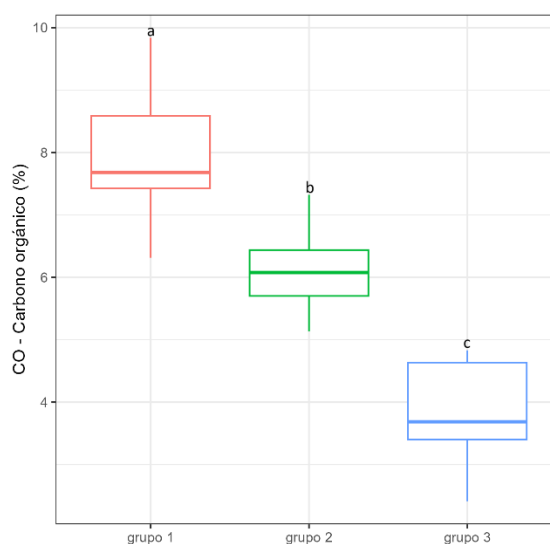
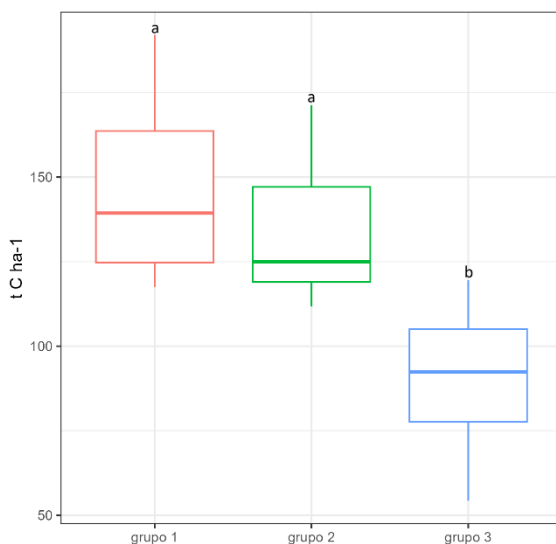
Versión:
3

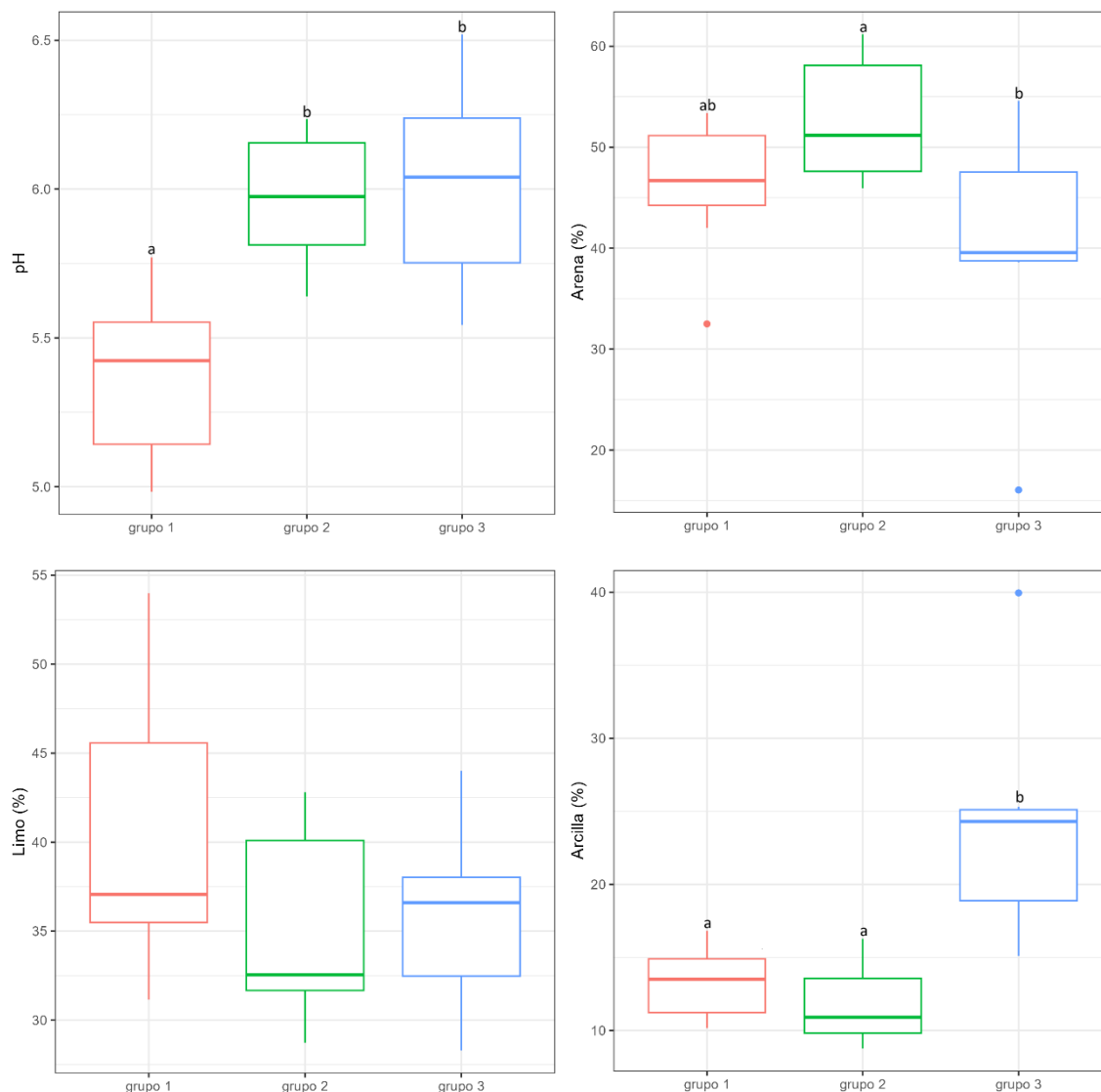
Fecha:
27/01/2022

Página:
34 de 55



JARDÍN BOTÁNICO
DE BOGOTÁ

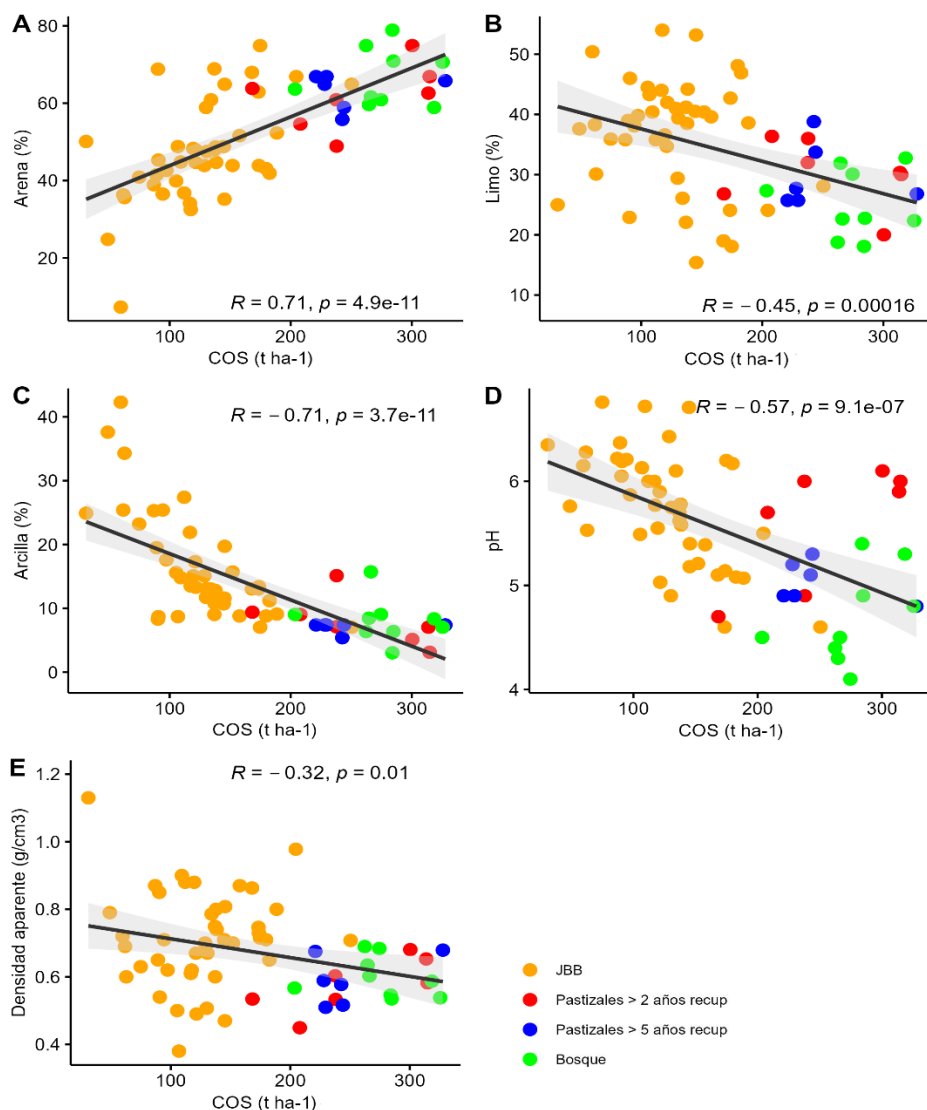






Gráfica 7. Diagramas de cajas. Variables: t C ha-1 (almacenamiento de carbono orgánico), CO (carbono orgánico), MO (materia orgánica), DA (densidad aparente), porcentaje de arena, limo y arcilla en tres grupos de colecciones vivas del Jardín Botánico.

10.2 Relación entre propiedades fisicoquímicas del suelo y el COS

El contenido de arena se relacionó positivamente con el almacenamiento de carbono en el suelo (0.71); mientras el contenido de limo (-0.45), arcilla (-0.71), pH (-0.57) y densidad aparente (-0.32) presentaron una relación negativa con el almacenamiento de COS (Gráfica 8).



Gráfica 8. Regresiones lineales simples entre las propiedades del suelo y el almacenamiento de carbono orgánico del suelo que tuvieron una relación significativa con $p < 0.05$, $p < 0.01$ y/o $p < 0.001$.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 37 de 55	

En cuanto a la textura del suelo, se encontró que suelos con poros más grandes (> % de arena) tienen mayor capacidad de almacenamiento de COS, mientras poros más pequeños (> % de arcilla) pueden estar limitando la reserva de carbono. Así, el porcentaje de arena exhibió una relación positiva con el almacenamiento de carbono (Gráfica 8.A), con valores más altos de arena y COS en el bosque; mientras en el JBB se presentaron valores más bajos de arena y COS. Por otro lado, los porcentajes de limo y arcilla exhibieron una relación inversa con el COS, alcanzando valores más altos en el JBB y más bajos en el bosque (Gráfica 8.B, C).

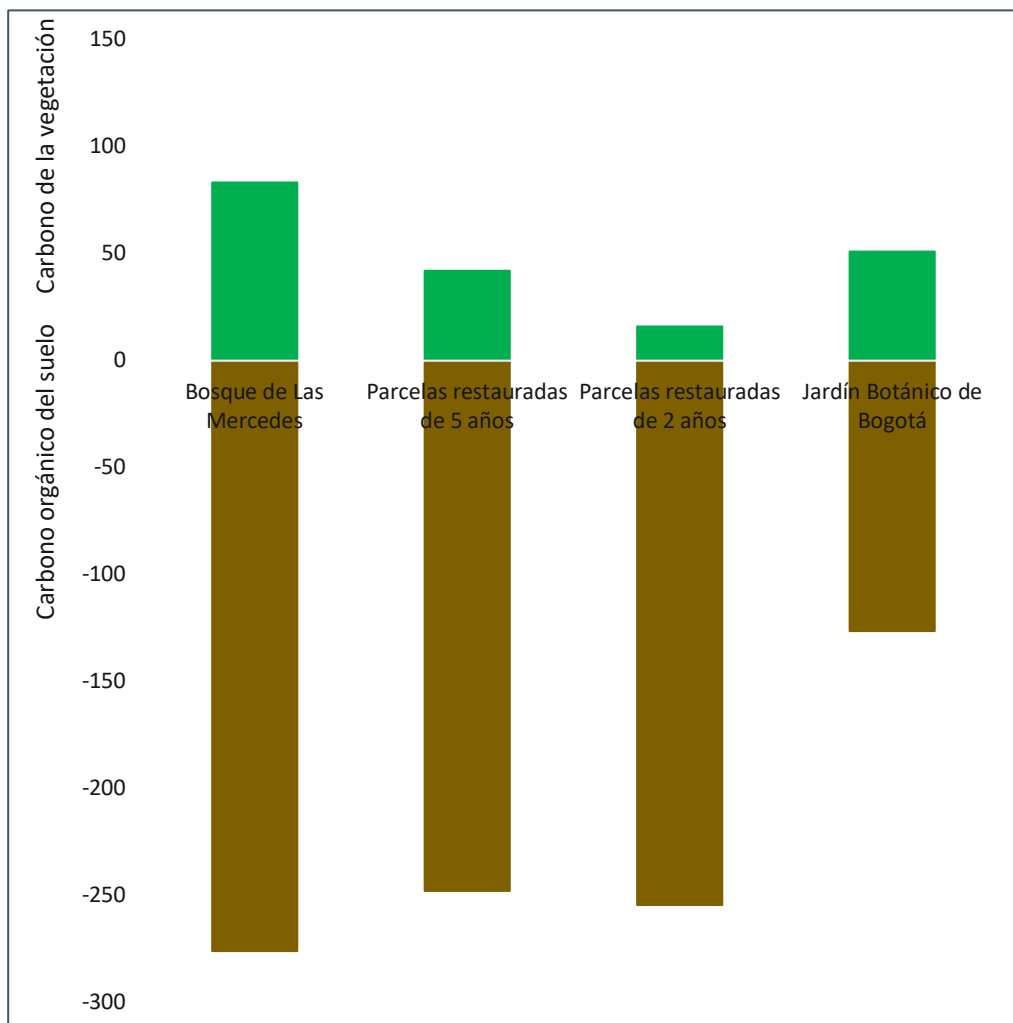
La relación inversa entre el COS y el pH refleja que suelos más ácidos presentaron un mayor contenido de carbono orgánico en el suelo. En el área de estudio el bosque exhibió suelos más ácidos y mayor contenido de carbono, mientras en el Jardín Botánico el contenido de carbono fue inferior y se relacionó con valores ligeramente más altos de pH, que igualmente clasifican con pH ácido (Gráfica 8.D).

Finalmente, se encontró una relación inversa entre la densidad aparente y carbono orgánico del suelo. En el sitio mejor conservado (bosque) se presentaron valores más bajos de densidad aparente, es decir suelos más porosos que favorecen la actividad biológica y la acumulación de materia orgánica en el suelo; en comparación a los suelos del Jardín Botánico que fueron menos porosos (con una alta densidad aparente) que limitaron la aireación del suelo y, por lo tanto, el reciclaje y la acumulación de materia orgánica y carbono (Gráfica 8.E).

10.3 Comparación entre el carbono de la vegetación y el carbono orgánico del suelo



Para hacer este análisis se tuvieron en cuenta 2 investigaciones: la investigación realizada por Monroy Hernández et al. (2022), en la que se estimó la captura del carbono en la biomasa de la vegetación del área del Jardín Botánico de Bogotá en un promedio por hectárea de 50 t C^{-1} y la investigación de Lopera Doncel (2023) en la que se estimó el total del carbono por encima del suelo en el bosque de Las Mercedes y dos áreas reforestadas con 5 y 2 años de haber sido restauradas con valores de 83.3 t C^{-1} para el Bosque, 42.07 t C^{-1} para las áreas restauradas de 5 años y de 15.9 t C^{-1} para las áreas restauradas de 2 años.

Con los datos de estimaciones de carbono de estas dos investigaciones (Lopera Doncel 2023; Monroy Hernández et al. 2022) se graficó el total del carbono por encima del suelo, y con los datos de esta investigación se graficó el total del carbono por debajo del suelo y se elaboró la gráfica 9.



Gráfica 9. Diagramación del total del carbono presente encima y debajo del suelo en datos absolutos. En verde se presenta la estimación total del carbono de la biomasa por encima del suelo, a partir de información secundaria: para el JBB a partir de la investigación de (Monroy Hernández et al. 2022), para el área de Las Mercedes a partir de la investigación de Lopera Doncel (2023) y en café se presenta la información obtenida en esta investigación de COS.

En esta gráfica 9 se observa que el carbono orgánico del suelo fue mucho mayor en comparación al carbono de la vegetación encima del suelo en todas las áreas. Esta mayor proporción de mayor a menor se presenta primero en las Parcelas restauradas de 2 años, luego, en el Bosque de Las Mercedes, en las áreas restauradas de 5 años y por último en el Jardín Botánico.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <small>Jardín Botánico José Celestino Mutis</small>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 39 de 55	

Es importante indicar que tanto en el Bosque de las Mercedes como las parcelas restauradas se presentaron altos valores de COS, y relativos bajos valores de carbono en la vegetación. En este sentido, en las parcelas restauradas, aunque ocurrió un gran cambio en la vegetación encima del suelo, porque la vegetación del bosque nativo desapareció, las reservas de carbono del COS se mantuvieron altas, y no se perdieron en el momento en el que el bosque fue transformado a potrero.



Este resultado muestra que el cambio de cobertura de bosque a no bosque fomentó una pequeña pérdida en las reservas del carbono orgánico del suelo, que continuó siendo relativamente pequeña entre parcelas restauradas de 2 y de 5 años ya que se perdió 5.6 t CO₂ ha⁻¹ en 3 años de proceso de restauración. sería interesante conocer si esa pérdida de carbono orgánico del suelo continua a largo plazo, como una consecuencia retardada del cambio de cobertura de bosque a no bosque, aunque el área esté en proceso de restauración y recuperación.

11. DISCUSIÓN

Al evaluar el almacenamiento de carbono orgánico del suelo en el Jardín Botánico de Bogotá y el Predio Las Mercedes encontramos que los suelos del JBB tuvieron valores más bajos de COS en comparación con Las Mercedes. Además, al interior de Las Mercedes el COS fue similar entre pastizales en proceso de recuperación y el bosque. Estos resultados reflejan que coberturas naturales conservadas y en proceso de restauración tienen mayor capacidad de almacenar carbono en comparación a coberturas urbanas, como es el caso del JBB. Aun así, los valores de COS registrados en el JBB son cercanos a lo reportado en otros bosques andinos de Cundinamarca y Tolima (Andrade Castañeda, Alvarado, y Segura 2013; ISRIC 2024), y más bajos a lo encontrado en páramos (Gutiérrez Díaz et al. 2020). Adicionalmente, estos resultados se explican por las propiedades fisicoquímicas del suelo como la densidad aparente, pH y arcilla que exhibieron relaciones inversas con el COS, mientras suelos más porosos con mejor capacidad de aireación (baja densidad aparente, mayor contenido de arena) se relacionaron con un mayor almacenamiento de COS.

11.1 Carbono orgánico del suelo y otras propiedades fisicoquímicas en áreas de importancia ecológica de Bogotá.

El carbono orgánico del suelo en áreas verdes, parques urbanos y zonas periurbanas es un reservorio fundamental para hacer frente a la crisis climática, considerando que las ciudades aportan cerca del 70% de las emisiones de CO₂ (IPCC, 2019b; Weissert et al., 2014). De manera que, es fundamental promover acciones de conservación y uso




 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 40 de 55	

adecuado del suelo para garantizar su capacidad de almacenar y capturar carbono (FAO, 2017). En el JBB y el predio Las Mercedes encontramos valores muy importantes de COS que aportan al Distrito Capital en la estrategia de mitigación de cambio climático. Además, se reconoce que los tecnosoles, suelos creados en áreas urbanas para soportar diversos estratos de vegetación, proveen una diversidad de funciones del suelo y servicios ecosistémicos como la generación de productos vegetales para alimentación, provisión de hábitats de biodiversidad, lugares para actividades de educación ambiental o recreativas y el secuestro de carbono (Barredo et al., 2020).

El carbono orgánico del suelo en el Jardín Botánico tuvo un valor promedio de 126.34 t C ha⁻¹, lo cual es superior a lo reportado en el sistema SoilGrids (ISRIC 2024) en donde se estima un promedio de 87-90 t C ha⁻¹ (Bolívar Gamboa et al. 2021). Esto se atribuye a la escala de medición, ya que los estudios de suelo a nivel global emplean escalas amplias (>250 metros de resolución) que no son comparables con estudios locales. De manera que si bien plataformas como la del Centro Internacional de Información y Referencia de Suelos – ISRIC aportan información de referencia, siempre es necesario validar estos datos con la colecta puntual de muestras de suelo.

En la otra área de estudio, que corresponde al predio Las Mercedes, el almacenamiento de carbono estuvo entre 247 - 276 t C ha⁻¹, siendo superior a lo reportado por la FAO (2024), quienes encontraron entre 111.6 y 153.04 t C ha⁻¹ en áreas de la Reserva Thomas van de Hammen. Otro estudio realizado en fincas y bosques nativos del municipio de Santa Isabel, Tolima; reportaron valores de 139 a 153 t CO ha⁻¹ en áreas con altitud de 2400 msnm. Estudios de suelos en Ecuador reportaron en áreas altas de los Andes un stock de carbono de 120 t C ha⁻¹ en temperaturas de entre -3 y 18 °C sobre suelos volcánicos (Loayza et al. 2020). Estas comparaciones muestran que nuestros datos están por encima de estos valores de referencia, lo cual puede atribuirse en parte a la metodología de estimación empleada en este estudio (método de calcinación), mientras en los estudios mencionados se empleó el método Walkley-Black.

En este contexto, al comparar los valores de carbono orgánico del suelo del predio Las Mercedes con el estudio de Lopera Doncel (2023) en los mismos sitios, se evidencia que los valores aquí reportados son en general menores (382.3 t C ha⁻¹). Estas diferencias pueden atribuirse a aspectos metodológicos, ya que en el estudio de Lopera (2023) se usó el método Walkley-Black, más exacto que el método de calcinación usado en esta investigación, y que puede estar sobreestimando esta variable. No obstante, según (Izquierdo Bautista y Arévalo Hernández 2021) el método de calcinación al ser más

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <small>Jardín Botánico José Celestino Mutis</small>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ  JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 41 de 55	




económico permite obtener el COS fácilmente, aunque presente valores más altos en comparación al método Walkley-Black.

El almacenamiento de COS no cambio entre el bosque de Las Mercedes y las coberturas en proceso de restauración de más de 2 y 5 años. Los valores cercanos de COS en Las Mercedes se atribuyen al mantenimiento del suelo cubierto, que permite mantener las reservas de carbono tanto en pastos como en coberturas boscosas (Aguirre Forero et al. 2022; Paustian et al, 2019; FAO 2017; R. Lal 2004). De dejar al suelo descubierto, el proceso de mineralización haría interferencia con la formación del carbono estable. De ahí la importancia del suelo cubierto para evitar la pérdida del COS a pesar del cambio de cobertura de bosque a no bosque (Aguirre Forero et al. 2022; Don, Schumacher, y Freibauer 2011; R. Lal 2004).

En el JBB, el almacenamiento de carbono es inferior al reportado en coberturas naturales de bosque andino y altoandino ($\sim 520 \text{ t C ha}^{-1}$) (Carvajal et al., 2009; Zúñiga et al., 2013); sin embargo, el COS hallado en el JBB ($126.34 \text{ t C ha}^{-1}$) no es un valor despreciable si se tiene en cuenta la condición de “tecnosoles” con materiales provenientes de diferentes partes de la ciudad, ya que la escala de tiempo en la que se pudo dar el almacenamiento de COS es menor a la de otras áreas más naturales. El stock de carbono encontrado en el JBB es cercano a lo reportado en zonas intervenidas del PNR Chingaza ($135.1 \text{ t C ha}^{-1}$) y otras coberturas transformadas de bosque andino y altoandino ($141.5 \text{ t C ha}^{-1}$) (Montes-Pulido, 2017).

Respecto a la textura del suelo, se encontró que los suelos de Las Mercedes tienen un mayor contenido de arenas en comparación con el JBB, en donde el porcentaje de arcillas fue superior. Estos resultados sugieren que los suelos del JBB tienen poros más pequeños, lo cual podría reducir la capacidad de aireación e infiltración (Andrade Castañeda et al. 2013; Gaucher 1971; Rojas, Andrade, y Segura 2018). Sin embargo, se debe tener precaución con esta interpretación, debido a que el porcentaje de arcilla es inferior al 20% y el contenido de arenas fue superior al 45%, lo que permite clasificar los suelos del JBB como textura “franco”. Cabe señalar que porcentajes de arcilla superiores al 50% y de arena mayores al 75% pueden ocasionar problemas de compactación en áreas de uso intensivo (USDA, 2006), de manera que los porcentajes hallados en el JBB no suponen preocupación al respecto.

En cuanto a la densidad aparente, el valor promedio del bosque de Las Mercedes (0.61 g cm^{-3}) fue similar a lo reportado por Lopera Doncel (2023) en este mismo lugar, quien reportó un valor promedio de 0.64 g cm^{-3} . Nuestros datos también fueron similares a lo encontrado

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <small>Jardín Botánico José Celestino Mutis</small>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ  JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 42 de 55	



Cely Reyes et al. (2016) en páramos del altiplano cundiboyacense con valores de 0.58 g cm^{-3} . Con respecto a la densidad aparente en el JBB (0.71 g cm^{-3}), otros investigadores reportaron datos similares en cafetales del Líbano, Tolima (Andrade Castañeda et al. 2013) con valores de 0.83, 0.88 y 0.92 g cm^{-3} en sistemas de producción. Al igual que Cely Reyes et al. (2016) quienes reportaron en páramos del altiplano cundiboyacense con actividad agrícola valores de 0.72 y 0.70. Esta similaridad de la densidad aparente entre el JBB y áreas cultivadas hace pensar que los suelos del JBB se asemejan a suelos de cultivo.

Finalmente, en relación al pH del suelo, en el bosque de Las Mercedes se tuvo un valor promedio 4.6, siendo este el valor límite en el que predomina el aluminio en forma soluble, intercambiable y tóxico para las plantas (Rivera Méndez et al. 2016). Esta acidez del suelo está relacionada con la cantidad y saturación de aluminio intercambiable que con un pH ácido se vuelve tóxico para las plantas, al interferir con la absorción del calcio que promueve la fijación del fósforo y afecta la división celular (IGAC, 2005). Por su parte, en el JBB se tuvo un valor promedio de pH de 5.76, que sugiere que tienden a ser ácidos. Estudios en suelos urbanos de México reportan que un pH de 5.2 a 7.0 es óptimo para el desarrollo de árboles, debido a que en este rango se garantiza una reserva apropiada de macro y micronutrientes (Amacher et al., 2007; Costello et al., 2003), sugiriendo que los suelos del JBB presentan un rango favorable para el establecimiento de las colecciones vivas.

11.2 Relación entre propiedades fisicoquímicas del suelo y el COS

En este estudio evidenciamos que el almacenamiento de COS exhibió una relación positiva con el porcentaje de arena e inversa con respecto a contenido de limo y arcilla. En el bosque de Las Mercedes se presentaron valores más altos de arena que sugieren mayor porosidad del suelo en el bosque y en áreas en proceso de restauración. La porosidad aporta capacidad para mantener y capturar COS; mientras en el JBB, el porcentaje de arenas fue inferior (menos porosidad). Aun así, el almacenamiento de COS en el JBB es considerable y, si bien el contenido de arena es inferior a Las Mercedes, esta condición no está reduciendo su capacidad de retener carbono, debido a que en promedio los suelos del JBB tienen un 47.23% de arena, lo cual es adecuado para permitir aireación del suelo, proporcionando las condiciones para la actividad microbiana y flujo de agua y nutrientes (Gaucher 1971).

Además, el almacenamiento de COS se relacionó inversamente con la densidad aparente - Da, sugiriendo que suelos con menor capacidad de aireación y baja porosidad ($> Da$) tienen menor capacidad de retención de carbono, tal y como se presentó en el JBB en comparación con el predio Las Mercedes. Esto puede explicarse porque poros más

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 43 de 55	



pequeños influyen en la capacidad de infiltración y pueden estar limitando el flujo de nutrientes y por tanto el almacenamiento de COS. La correlación inversa entre DA y COS ya ha sido encontrada en otras investigaciones (Andrade Castañeda et al. 2013; Martínez et al. 2008). Andrade Castañeda et al. (2013) encontraron en cafetales del Tolima que a medida que se integra el carbono orgánico al suelo, aumenta la porosidad y disminuye su compactación. En diversos estudios se resalta el papel del COS en la agregación y distribución del espacio poroso, lo que favorece el crecimiento radicular, la aireación, el movimiento del agua y el flujo de los nutrientes (Martínez et al. 2008; Rico, 2018).

En relación con la acidez del suelo, se presentó una tendencia de mayor acumulación de COS en suelos ácidos. Estos resultados parciales deben ser analizados bajo la perspectiva de que el suelo es complejo de entender porque depende de numerosas variables, es sensible al clima y al medio ambiente y al manejo que se haya hecho en el pasado reciente y futuro; por lo tanto, estas correlaciones deben ser analizadas en conjunto con otras variables que no fueron estimadas en esta investigación. Esta correlación puede atribuirse a una alta presión del CO₂ de la atmósfera presenta en el suelo, que al combinarse con agua genera H⁺ y acidifica el suelo (Martínez et al. 2008). En este sentido, la relación entre acidez y COS hace evidente una dependencia en la cual la acidez permite que el carbono orgánico sea mayor, es decir se acumule, pero no necesariamente esté disponible para el uso de las plantas y los microorganismos.

11.3 Comparación entre el carbono orgánico de la vegetación y el carbono orgánico del suelo

En una investigación en el Estado de Campeche en México, se encontró que el carbono orgánico del suelo fue en promedio de 64.1 % del total y el carbono de la vegetación correspondió al 35.9% (Pool-Novelo et al. 2019); Mientras que en este estudio el promedio, incluyendo las cuatro áreas fue de 81.9% del COS y 18.1 % del carbono de la vegetación. Estos resultados confirman el gran depósito de carbono del COS en coberturas naturales en comparación con lo acumulado por la vegetación (Zomer et al. 2017), este resultado también confirma a escala local, la hipótesis de que el COS constituye una importante a inmensa reserva de carbono en comparación a las reservas de carbono de la vegetación encima del suelo (Castañeda-Martín y Montes-Pulido 2017b; Friedlingstein et al. 2019; H.H. Janzen 2004; R. Lal 2004; Paustian et al. 2019; Zomer et al. 2017).

El suelo y la vegetación se consideran una de las mayores reservas de carbono de la biosfera terrestre con un almacenamiento estimado de más de 2.300 Pg C año⁻¹ (FAO, 2017). Específicamente el suelo constituye el mayor reservorio de carbono en los

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <small>Jardín Botánico José Celestino Mutis</small>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 44 de 55	




ecosistemas terrestres (FAO, 2017). Tan solo en el primer metro del suelo se ha cuantificado un stock de $\sim 1.500 \text{ Pg C}$, lo cual representa hasta tres veces más del carbono almacenado en la vegetación (FAO, 2017; Meister et al., 2012). Esto confirma lo reportado en esta investigación, con aproximadamente 4 veces más de carbono en el suelo en comparación con la vegetación. De ahí que un manejo adecuado del suelo sea fundamental para hacer frente a la degradación del suelo y el cambio climático (FAO, 2017; IPCC, 2019b).

Por lo anterior, se resalta la importancia del compartimento carbono orgánico del suelo; tanto a nivel planetario, a escala global, y a nivel urbano a escala local, es clave. El suelo representa un gran reservorio de carbono orgánico y alto potencial de captura de carbono, sumando cantidades que a veces no son valoradas ni conocidas, probablemente porque no se pueden ver y no son tan fáciles de cuantificar. De ahí que su estudio a nivel urbano sea significativo para la ciudad, para orientar acciones de recuperación de suelos degradados y promover acciones de conservación de suelos como estrategia de mitigación del cambio climático.

12. CONCLUSIONES

El Jardín Botánico presentó menores valores de contenido de carbono orgánico del suelo con $126.34 \pm 44.35 \text{ t C ha}^{-1}$, en comparación con el área natural del Bosque de Las Mercedes que tuvo $276.01 \pm 35.45 \text{ t C ha}^{-1}$ y a las áreas que lo rodearon que fueron restauradas hace más de 2 y 5 años, que presentaron entre 248 y 254 t C ha^{-1} . En Las Mercedes se presentaron valores similares entre las coberturas de bosque natural y áreas restauradas. Este resultado muestra que a pesar de que en las áreas restauradas se haya perdido la cobertura del bosque, el COS se mantuvo y no se emitieron grandes cantidades de CO_2 a la atmósfera, secuestradas en el suelo por el cambio de cobertura.

El almacenamiento inferior de COS en el JBB en comparación con Las Mercedes puede atribuirse a la condición del suelo derivado de material proveniente de diferentes partes de la ciudad que se denomina “tecnosoles”. Estos suelos fueron construidos para soportar las colecciones vivas del Jardín Botánico y por esto exhiben una amplia variabilidad en sus propiedades fisicoquímicas. Aun así, es de destacar que el uso y manejo de los suelos del JBB ha favorecido altos aportes de materia orgánica y carbono, permitiendo el establecimiento óptimo de árboles, arbustos y herbáceas en el JBB. El COS si bien es más bajo en comparación con coberturas naturales conservadas de bosque altoandino y páramo, se encuentra por encima de lo reportado en suelos urbanos y periurbanos y cercano a suelos transformados de cultivos y sistemas agroforestales de bosque andino.



 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <small>Jardín Botánico José Celestino Mutis</small>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ  JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 45 de 55	

En términos de otras propiedades fisicoquímicas del suelo, en Las Mercedes se encontraron suelos más ácidos, pero con mejor capacidad de aireación y circulación de nutrientes y agua (menor densidad aparente y mayor porcentaje de arenas). Mientras, los suelos del JBB tuvieron menor capacidad de aireación, penetración de raíces y flujo de nutrientes, ya que allí se presentaron valores más altos de densidad aparente y más alto porcentaje de arcillas en comparación con Las Mercedes. Este resultado puede ser reflejo del pisoteo de los visitantes, y de la maquinaria del Jardín Botánico puede estar afectando la densidad aparente del suelo. Este apelmazamiento también puede estar afectando la capacidad de captura del carbono en forma de carbono orgánico del suelo al hacerlo menos aeróbico y fomentar una posible pérdida y/o interferir con la acumulación en el suelo.

Para fomentar el aumento de las reservas de COS en el Jardín Botánico se recomienda evitar que el suelo quede desnudo, de tal manera que se acumule la necro masa y caída de hojarasca para fomentar el crecimiento de la fauna edáfica y con ello aumentar la porosidad del suelo, la aireación, la infiltración, el flujo de materia orgánica y la concentración de carbono orgánico, y de esta manera mejorar las condiciones para el crecimiento de las plantas. El mantenimiento de la cubierta del suelo en las áreas restauradas de 2 y 5 años del Bosque de Las Mercedes ha permitido que el COS se mantenga y se minimicen las pérdidas por posibles procesos de mineralización y afectación de las formas estables en el tiempo del carbono que se mantienen en forma de humus. Es posible que el mantenimiento de un suelo cubierto también haya influido en la relativa alta acumulación de COS del Jardín Botánico.

El alto contenido de COS encontrado en los lugares estudiados muestra que este compartimento de reserva de carbono COS es relativamente estable, y no está directamente afectado por fenómenos como el cambio de cobertura de bosque a no bosque. Por esta estabilidad en las reservas del COS se observa que las emisiones de carbono que se presentan cuando hay un cambio de cobertura de bosque a no bosque se dan por las pérdidas del carbono encima del suelo, y no tanto por pérdida de carbono por debajo del suelo en forma de COS. Esta captura y secuestro del COS a prueba de cambio de cobertura también está relacionado con la ausencia de actividades de labranza que, en la literatura, lo asocian con una de las principales causas de pérdida de las reservas del COS por aceleración de procesos de mineralización, pérdida del carbono lábil del suelo y destrucción de los agregados naturales del suelo.

Con este resultado parcial, se evidencia que en un contexto del cambio climático y cambio de uso del suelo es fundamental garantizar el uso adecuado del suelo para minimizar pérdidas de carbono. Las reservas de carbono orgánico del suelo son más altas que lo

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <small>Jardín Botánico José Celestino Mutis</small>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 46 de 55	

acumulado en la vegetación encima del suelo, de manera que es prioritario orientar un manejo adecuado no solo de la vegetación sino también del suelo, con prácticas que consideren mantener el suelo cubierto para minimizar las pérdidas y disminuir las emisiones de CO₂ a la atmósfera por cambios de cobertura.

13. RECOMENDACIONES

En el manejo del suelo del Jardín Botánico se recomienda evitar al máximo la presencia de suelos desnudos, en este sentido fomentar al máximo el cubrir el suelo de necromasa, hojarasca, pasto cortado, material chipeado, adición de biocarbono (Paustian et al, 2019) composta, etcétera, para fomentar el crecimiento de la fauna del suelo, y con ello, la porosidad, la aireación, la fauna edáfica y la acumulación de materia y carbono orgánico en el suelo.



Se recomienda hacer un seguimiento continuo del COS en intervalos de 5-10 años para poder conocer las tendencias y o los cambios (FAO 2017) de esta variable que suelen ser de naturaleza estable en algunos sus componentes húmicos.

Para futuras investigaciones se sugiere que, debido a la variabilidad encontrada en los datos obtenidos en el Jardín Botánico de Bogotá, es clave realizar un monitoreo del COS a lo largo de un período ojalá anual para conocer como varía con los períodos de precipitación, aunque se esperaría que fuese poco variable, y a escalas mayores para conocer cómo cambia a mediano y a largo plazo.

Con respecto a el área de Las Mercedes, sería recomendable hacer un estudio anual del comportamiento del COS, que debería ser muy estable o sensible a cambios de temperatura y precipitación, además este estudio debería incluir áreas afectadas por labranza, ganadería, áreas fertilizadas, áreas encaladas, suelos desnudos, y áreas con manejos diversos, para comprender como es el proceso de captura y evolución del COS bajo diferentes manejos en el contexto de la ruralidad de Bogotá.

14. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias a la aprobación y coordinación de Maribel Vásquez Valderrama, se pudo llevar a cabo gracias al generoso y empático apoyo técnico y operativo de José Wilfredo López, y se pudo culminar gracias al apoyo y análisis de porcentajes de

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 47 de 55	

arenas limos y arcillas que realizó la estudiante Luisa Fernanda Álvarez, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

15. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES



Las dos investigadoras relacionadas como autoras en este documento participaron de forma equitativa en todas las fases de la investigación.

16. CONFLICTO DE INTERESES



Los autores declaran que han cumplido totalmente con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo; que este estudio fue financiado en su totalidad por el Jardín Botánico de Bogotá y que las ideas aquí plasmadas corresponden al criterio de los autores y no del Jardín Botánico de Bogotá.

17. BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre Forero, Sonia Esperanza, Nelson Virgilio Piraneque Gambasica, y Teobaldis Mercado Fernández. 2022. *Suelo y cambio climático. Incluye estudio de casos*. Universidad del Magdalena.
- Ahirwal, Jitendra, Sneha Kumari, Ashutosh Kumar Singh, Adarsh Kumar, y Subodh Kumar Maiti. 2021. «Changes in soil properties and carbon fluxes following afforestation and agriculture in tropical forest». *Ecological Indicators* 123:107354. doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107354.
- Alavi-Murillo, Gavi, Jan Diels, Jere Gilles, y Patrick Willems. 2022. «Soil organic carbon in Andean high-mountain ecosystems: importance, challenges, and opportunities for carbon sequestration». *Regional Environmental Change* 22(4). doi: 10.1007/s10113-022-01980-6.
- Andrade Castañeda, Hernán Jair, Jhon Alvarado, y Milena Segura. 2013. «Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) En el municipio del Líbano, Tolima, Colombia». *Colombia Forestal* 16(1):21. doi: 10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a02.
- Azula, Catalina. 2021. *Informe Técnico: evaluación del proceso de restauración ecológica en el Bosque Las Mercedes a partir de rasgos funcionales de las aves como indicadores ecológicos*.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 48 de 55	

- Bajgai, Y., P. Kristiansen, N. Huligalbe, y M. Melinda. 2014. «Factors and mechanisms regulating soil organic carbon in agricultural systems». en *Agroecology, {Ecosystems}, and {Sustainability}*, editado por N. Benkeblia. CRC Press.
- Baldock, J. A., I. Wheeler, N. McKenzie, y A. McBratney. 2012. «Soils and climate change: potential impacts on carbon stocks and greenhouse gas emissions, and future research for {Australian} agriculture». *Crop and Pasture Science* 63(3):269-83. doi: 10.1071/CP11170.
- Bolívar Gamboa, Adriana, Camilo Andrés Camacho Hilarión, Napoleón Ordoñez Delgado, Joan Gutiérrez Díaz, German Álvarez Lucero, Mario Guevara Santamaría, Carolina Olivera, Guillermo Olmedo, Sally Bunning, y Ronald Vargas. 2021. «Estimación de carbono orgánico del suelo en Colombia, una herramienta de gestión del territorio»: *Ecosistemas* 30(1):2019-2019. doi: 10.7818/ECOS.2019.
- Carvajal, Andrés F., Alexander Feijoo, Heimar Quintero, y Marco A. Rondón. 2009. «Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos». *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 9(3):222-35. doi: 10.4067/s0718-27912009000300005.
- Castañeda-Martín, Abel Efrén, y Carmen Rosa Montes-Pulido. 2017a. «Carbono almacenado en páramo andino». *Entramado* 13(1):210-21. doi: 10.18041/entramado.2017v13n1.25112.
- Castillo-Pacheco, Lucía A., Jose I. Bojórquez-Serrano, Alberto Hernández-Jiménez, y Diego García-Paredes. 2016. «Contenidos de carbono orgánico en suelos bajo diferentes coberturas vegetales y de cultivo». *Cultivos Tropicales* 37(3):72-78. doi: 10.13140/RG.2.1.2035.4805.
- Cely Reyes, Germán Eduardo, José Ricardo López Dulcey, Pablo Antonio Serrano Cely, Oscar Hernando Bernal Vargas, Omar Alexis Cely Reyes, y Diego Fernando Moreno Pérez. 2016. *Suelos de los páramos de Boyacá: ecosistemas potenciales para la captura de carbono*. Primera edición. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Don, Axel, Jens Schumacher, y Annette Freibauer. 2011. «Impact of Tropical Land-Use Change on Soil Organic Carbon Stocks - a Meta-Analysis: SOIL ORGANIC CARBON AND LAND-USE CHANGE». *Global Change Biology* 17(4):1658-70. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x.
- Eyherabide, Mercedes, Hernán Saínz Rozas, Pablo Barbieri, y Hernán Eduardo Echeverría. 2014. «Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo». *Ciencia del Suelo* 32(1):13-19.



 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 49 de 55	

FAO. 2017. *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. Roma, Italia: FAO.

FAO. 2022. *Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq v.1.1) Technical report*. Rome, Italy.

Friedlingstein, Pierre, Matthew W. Jones, Michael O'Sullivan, Robbie M. Andrew, Judith Hauck, Glen P. Peters, Wouter Peters, Julia Pongratz, Stephen Sitch, Corinne Le Quéré, Dorothee C. E. Bakker, Josep G. Canadell, Philippe Ciais, Robert B. Jackson, Peter Anthoni, Leticia Barbero, Ana Bastos, Vladislav Bastrikov, Meike Becker, Laurent Bopp, Erik Buitenhuis, Naveen Chandra, Frédéric Chevallier, Louise P. Chini, Kim I. Currie, Richard A. Feely, Marion Gehlen, Dennis Gilfillan, Thanos Gkritzalis, Daniel S. Goll, Nicolas Gruber, Sören Gutekunst, Ian Harris, Vanessa Haverd, Richard A. Houghton, George Hurtt, Tatiana Ilyina, Atul K. Jain, Emilie Joetzjer, Jed O. Kaplan, Etsushi Kato, Kees Klein Goldewijk, Jan Ivar Korsbakken, Peter Landschützer, Siv K. Lauvset, Nathalie Lefèvre, Andrew Lenton, Sebastian Lienert, Danica Lombardozzi, Gregg Marland, Patrick C. McGuire, Joe R. Melton, Nicolas Metz, David R. Munro, Julia E. M. S. Nabel, Shin-Ichiro Nakaoka, Craig Neill, Abdirahman M. Omar, Tsuneo Ono, Anna Peregon, Denis Pierrot, Benjamin Poulter, Gregor Rehder, Laure Resplandy, Eddy Robertson, Christian Rödenbeck, Roland Séférian, Jörg Schwinger, Naomi Smith, Pieter P. Tans, Hanqin Tian, Bronte Tilbrook, Francesco N. Tubiello, Guido R. van der Werf, Andrew J. Wiltshire, y Sönke Zaehle. 2019. «Global Carbon Budget 2019». *Earth System Science Data* 11(4):1783-1838. doi: 10.5194/essd-11-1783-2019.

Friedlingstein, Pierre, Michael O'Sullivan, Matthew W. Jones, Robbie M. Andrew, Luke Gregor, Judith Hauck, Corinne Le Quéré, Ingrid T. Luijkx, Are Olsen, Glen P. Peters, Wouter Peters, Julia Pongratz, Clemens Schwingshackl, Stephen Sitch, Josep G. Canadell, Philippe Ciais, Robert B. Jackson, Simone R. Alin, Ramdane Alkama, Almut Arneth, Vivek K. Arora, Nicholas R. Bates, Meike Becker, Nicolas Bellouin, Henry C. Bittig, Laurent Bopp, Frédéric Chevallier, Louise P. Chini, Margot Cronin, Wiley Evans, Stefanie Falk, Richard A. Feely, Thomas Gasser, Marion Gehlen, Thanos Gkritzalis, Lucas Gloege, Giacomo Grassi, Nicolas Gruber, Özgür Gürses, Ian Harris, Matthew Hefner, Richard A. Houghton, George C. Hurtt, Yosuke Iida, Tatiana Ilyina, Atul K. Jain, Annika Jersild, Koji Kadono, Etsushi Kato, Daniel Kennedy, Kees Klein Goldewijk, Jürgen Knauer, Jan Ivar Korsbakken, Peter Landschützer, Nathalie Lefèvre, Keith Lindsay, Junjie Liu, Zhu Liu, Gregg Marland, Nicolas Mayot, Matthew J. McGrath, Nicolas Metz, Natalie M. Monacci, David R. Munro, Shin-Ichiro Nakaoka, Yosuke Niwa, Kevin O'Brien, Tsuneo Ono, Paul I. Palmer, Naiqing Pan, Denis Pierrot, Katie Pocock, Benjamin Poulter, Laure Resplandy, Eddy Robertson, Christian Rödenbeck, Carmen Rodriguez, Thais M. Rosan, Jörg Schwinger, Roland Séférian, Jamie D. Shutler, Ingunn Skjelvan, Tobias Steinhoff, Qing Sun, Adrienne J. Sutton, Colm Sweeney, Shintaro Takao, Toste Tanhua, Pieter P. Tans, Xiangjun Tian, Hanqin Tian, Bronte Tilbrook,

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 50 de 55	

Hiroiyuki Tsujino, Francesco Tubiello, Guido R. van der Werf, Anthony P. Walker, Rik Wanninkhof, Chris Whitehead, Anna Willstrand Wranne, Rebecca Wright, Wenping Yuan, Chao Yue, Xu Yue, Sönke Zaehle, Jiye Zeng, y Bo Zheng. 2022. «Global Carbon Budget 2022». *Earth System Science Data* 14(11):4811-4900. doi: 10.5194/essd-14-4811-2022.

García Portilla, Jason. 2003. «Análisis del potencial de emisión de dióxido de carbono del páramo de Chingaza y lineamientos para su conservación en el contexto del Mecanismo de Desarrollo Limpio.» 110.

Gaucher, G. 1971. *Tratado de pedología agrícola: el suelo y sus características agronómicas*. Barcelona: Omega.

Global Soil Partnership. 2018. *Mapa de carbono orgánico del suelo*. Rome, Italy: FAO.

Gutiérrez Díaz, Joan Sebastián, Napoleón Ordoñez Delgado, Adriana Bolívar Gamboa, Sally Bunning, Mario Guevara, Erika Medina, Carolina Olivera, Guillermo Olmedo, Lady Marcela Rodríguez, Víctor Sevilla, y Ronald Vargas. 2020. «Estimation of organic carbon in paramo ecosystem soils in Colombia». *Ecosistemas* 29(1). doi: 10.7818/ECOS.1855.

Hagan, D., C. Dobbs, N. Timilsina, F. Escobedo, G. S. Toor, y M. Andreu. 2012. «Anthropogenic effects on the physical and chemical properties of subtropical coastal urban soils». *Soil Use and Management* 28(1):78-88. doi: 10.1111/j.1475-2743.2011.00379.x.



Hiederer, Roland. 2009. *Distribution of organic carbon in soil profile data*. EUR 23980. Italy: EN. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.

Hoyle, FC. 2013. *Managing soil organic matter: A practical guide*. Kingston: Grains Research and Development Corporation.

IDEAM. 2018. «Manual de Campo Inventario Forestal Nacional Colombia». 160.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2005. *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Boyacá. T. 1*. editado por G. Martínez Pélaez. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

IPBES. 2019. *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 51 de 55	

IPCC. 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry /The Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ed. by Jim Penman. editado por J. Penman. Hayama, Kanagawa: The Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. 2019. *Calentamiento Global de 1,5 °C*.

ISRIC. 2024. «ISRIC — World Soil Information». *ISRIC — World Soil Information*. Recuperado 8 de mayo de 2024 (<https://www.isric.org>).

Izquierdo Bautista, Jaime, y John Jairo Arévalo Hernández. 2021. «Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación». *Ingeniería y Región* 26:20-28. doi: 10.25054/22161325.2527.

Jandl, Robert, y Mirco Rodeghiero. 2018. *Forest Soil Respiration under Climate Changing*.

Janzen, H H. 2004. «Carbon cycling in earth systems—a soil science perspective». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 104(3):399-417. doi: 10.1016/j.agee.2004.01.040.

Jones, Chris, Claire McConnell, Kevin Coleman, Peter Cox, Peter Falloon, David Jenkinson, y David Powlson. 2005. «Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil». *Global Change Biology* 11(1):154-66. doi: 10.1111/j.1365-2486.2004.00885.x.



Keesstra, S., J. Nunes, A. Novara, D. Finger, D. Avelar, Z. Kalantari, y A. Cerdà. 2018. «The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services». *Science of the Total Environment* 610-611:997-1009. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.077.

Lal, R. 2004. «Soil Carbon Sequestration to Mitigate Climate Change». *Geoderma* 123(1-2):1-22. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.01.032.

Lal, Rattan. 2017. «Soil organic carbon sequestration: importance state of science». en *Proceedings of the Global Symposium on soil organic carbon 2017*, editado por FAO.

Lei, Jiesi, Xue Guo, Yufei Zeng, Jizhong Zhou, Qun Gao, y Yunfeng Yang. 2021. «Temporal changes in global soil respiration since 1987». *Nature Communications* 1-9. doi: 10.1038/s41467-020-20616-z.

Loayza, Nancy Verónica, Víctor Sevilla, Carolina Olivera, Mario Guevara, Guillermo Olmedo, Ronald Vargas, Cecilio Oyonarte, y Wilmer Jiménez. 2020. «Digital mapping of organic carbon in Ecuador soils». *Ecosistemas* 29(2). doi: 10.7818/ECOS.1852.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 52 de 55	

Lopera Doncel, Catalina. 2019. «Flujo de CO₂ del suelo en diferentes coberturas en la microcuenca Torca, Bogotá».

Lopera Doncel, Catalina. 2023. «Almacenamiento de carbono y regulación de microclima en procesos de restauración en el bosque de las Mercedes y zonas anexas».

Martínez, Eduardo, Juan Pablo Fuentes, y Edmundo Acevedo. 2008. «Carbono Rgánico y Propiedades Del Suelo». *Revista de La Ciencia Del Suelo y Nutrición Vegetal* 8(1):68-96. doi: 10.4067/S0718-27912008000100006.

Meister, K., S. M. Ashton, D. Craven, y H. Griscom. 2012. «Carbon dynamics of tropical forests». Pp. 51-75 en *Managing Forest Carbon in a Changing Climate*.

Monroy Hernández, Julieth, Camila Andrea Salcedo Arias, Carol Estefany Salamanca Rojas, y Villegas Vargas. 2022. «Valoración integral del balance entre emisiones y almacenamiento de carbono en el Jardín Botánico de Bogotá con la perspectiva de carbono neutralidad».

Nazir, Muhammad Junaid, Guanlin Li, Muhammad Mudassir Nazir, Faisal Zulfiqar, Kadambot H. M. Siddique, Babar Iqbal, y Daolin Du. 2024. «Harnessing soil carbon sequestration to address climate change challenges in agriculture». *Soil and Tillage Research* 237:105959. doi: 10.1016/j.still.2023.105959.



Ostertag, R., E. Marín-Spiotta, W. L. Silver, y J. Schulten. 2008. «Litterfall and decomposition in relation to soil carbon pools along a secondary forest chronosequence in Puerto Rico». *Ecosystems* 11(5):701-14.

Paustian, Keith, Eric Larson, Jeffrey Kent, Ernie Marx, y Amy Swan. 2019. «Soil C Sequestration as a Biological Negative Emission Strategy». *Frontiers in Climate* 1:8. doi: 10.3389/fclim.2019.00008.

Peña, Magda Forero, y Sonia Yaneth Pérez Castellanos. 2015. «Propuesta para el Plan de Manejo Ambiental del Nodo de Biodiversidad Las Mercedes, Localidad de Suba, Bogotá».

Peña-Quemba, Diego. 2015. «Variabilidad del flujo de CO₂ del suelo bajo diferentes coberturas vegetales en el páramo de Guerrero». Universidad Nacional de Colombia.

Peña-Quemba, Diego, Yolanda Rubiano-Sanabria, y Diego Riveros-Iregui. 2016. «Efectos del uso del suelo sobre el flujo de CO₂ del suelo en el Páramo de Guerrero, Colombia». *Agronomía Colombiana* 34(3):364-73. doi: 10.15446/agron.colomb.v34n3.58791.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 53 de 55	

Pool-Novelo, Luciano, Víctor Manuel Kú-Quej, Jesús Chí-Quej, y Jorge Mendoza-Vega. 2019. «Estimación del contenido de carbono orgánico en suelos y vegetación del estado de Campeche. Propuesta metodológica.» *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA* 37(4):317. doi: 10.28940/terra.v37i4.461.

Quintero, Alexandra, Angie Montañez-S, y Carol Salamancar. 2023. «Variación del carbono orgánico en el suelo del Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis». 50.

Rivera Mendez, Yurany, Leonardo Moreno Chacón, M. Herrera Corzo, y Hernán Mauricio Romero Angulo. 2016. «La toxicidad por aluminio (Al³⁺) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de la palma de aceite*». *Revista Palmas* 37(1):11-23.

Rojas, Andrés Sebastián, Hernán Andrade, y Milena Segura. 2018. «Los suelos del paisaje Alto-Andino de Santa Isabel (Tolima, Colombia) ¿son sumideros de carbono orgánico?» *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 21(1). doi: 10.31910/rudca.v21.n1.2018.662.



Russo, Alessio, Francisco J. Escobedo, Nilesh Timilsina, Armin Otto Schmitt, Sebastian Varela, y Stefan Zerbe. 2014. «Assessing urban tree carbon storage and sequestration in Bolzano, Italy». *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management* 10(1):54-70. doi: 10.1080/21513732.2013.873822.

Saavedra-Romero, Luz de Lourdes, Dionicio Alvarado-Rosales, Tomás Martínez-Trinidad, y Patricia Hernández-De la Rosa. 2020. «Propiedades físicas y químicas del suelo urbano del Bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México». *Terra Latinoamericana* 38(3):529-40. doi: 10.28940/terra.v38i3.644.

Sánchez, A. M. Z., M. L. C. Carrascal, C. E. P. Roa, J. F. Gallardo, y I. D. G. Guzmán. 2006. *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. Igac.

Schindelbeck, Robert R., Harold M. van Es, George S. Abawi, David W. Wolfe, Thomas L. Whitlow, Beth K. Gugino, Omololu J. Idowu, y Bianca N. Moebius-Clune. 2008. «Comprehensive assessment of soil quality for landscape and urban management». *Landscape and Urban Planning* 88(2-4):73-80. doi: 10.1016/j.landurbplan.2008.08.006.

Schulte, E. E., y B. G. Hopkins. 1996. «Estimation of soil organic matter by weight loss-on-ignition». Pp. 21-31 en *Soil Organic Matter: Analysis and Interpretation*. Vol. 46, editado por F. R. Magdoff, M. A. Tabatabai, y H. Jr. E. A.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 54 de 55	

Suárez, Perez. 2022. «Caracterización de la vegetación del Bosque Las Mercedes y sus áreas anexas, Bogotá D.C. v2.0. Jardín Botánico de Bogotá “José Celestino Mutis”. Dataset/Occurrence».

Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2017. «Práctica de Descripción e Identificación de Suelos (Procedimiento Visual y Manual) | Laboratorio de Construcciones Civiles e Ingeniería Civil». Recuperado 29 de mayo de 2024 (<https://ftecnologica.udistrital.edu.co/laboratorios/civiles/index.php/laboratorio/practica/practica-de-descripcion-e-identificacion-de-suelos-procedimiento-visual-y>).

Vargas, Camilo Esteban Cadena, Shirley Dayana Sánchez Callejas, y Andrea Fernanda Morales Pisco. 2020. «Plantas amenazadas de la colección viva del Jardín Botánico de Bogotá». *Rev. Fac. Cienc. Básicas* 15(2):45-56. doi: 10.18359/rfcb.4382.

Vitousek, P. M. 1984. «Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests». *Ecology* 65(1):285-98.

Walteros Torres, Ingrid, Sofía Palacios-Pacheco, German Eduardo Cely, Pablo Antonio Serrano, y Diego Moreno-Pérez. 2022. «Influencia del cambio de uso del suelo sobre las reservas de carbono orgánico en el Parque Natural Regional Cortadera, Boyacá (Colombia)». *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 25(2).




Weissert, L. F., J. A. Salmond, y L. Schwendenmann. 2014. «A review of the current progress in quantifying the potential of urban forests to mitigate urban CO₂ emissions». *Urban Climate* 8:100-125. doi: 10.1016/j.uclim.2014.01.002.

Wu, Bing-Jie, Wah Soon Chow, Yu-Jun Liu, Lei Shi, y Chuang-Dao Jiang. 2014. «Effects of stomatal development on stomatal conductance and on stomatal limitation of photosynthesis in *Syringa oblata* and *Euonymus japonicus* Thunb». *Plant Science* 229:23-31. doi: 10.1016/j.plantsci.2014.08.009.

Yang, Juejie, Aiyang Li, Yunfeng Yang, Guanghe Li, y Fang Zhang. 2020. «Soil organic carbon stability under natural and anthropogenic-induced perturbations». *Earth-Science Reviews* 205:1-9. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103199.

Zomer, Robert J., Deborah A. Bossio, Rolf Sommer, y Louis V. Verchot. 2017. «Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils». *Scientific Reports* 7(1):15554. doi: 10.1038/s41598-017-15794-8.

Zúñiga-Escobar, Orlando, Enrique Javier Peña-Salamanca, Alba Marina Torres-González, Ramiro Cuero-Guependo, y Julián Andrés Peña-Óspina. 2013. «Determinación del impacto de actividades antrópicas en el almacenamiento de carbono en suelos de ecosistemas de alta montaña en Colombia». *Agronomía Colombiana* 31(1):112-19.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <small>Jardín Botánico José Celestino Mutis</small>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ 
	GEN – GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 27/01/2022	Página: 55 de 55	

18. ANEXOS

Sin anexos.