



COLEÇÃO
ESTUDOS
CARIOCAS

Volumen
14

Número
1

*Autor(a) correspondiente
beaamgarcia@ufrj.br

Envío 21 nov 2025

Aceptación 06 abr 2026

Publicación 30 abr 2026

¿Cómo citar?

OLIVEIRA, B. A. G.; MALUF,
V. B. V.; FEVRIER, P. V. R.

Áreas Protegidas como
sumideros de carbono en la
ciudad de Río de Janeiro:

Propuesta metodológica y
aplicación del modelo
Carbon Storage and
Sequestration del software
InVEST 3.14. Coleção
Estudos Cariocas, v. 14, n.

1, 2026.,
DOI: 10.71256/19847203.14.1.198.2026.

El artículo fue
originalmente enviado en
PORTUGUÉS. Las
traducciones a otros
idiomas fueron revisadas y
validadas por los autores y
el equipo editorial. Sin
embargo, para una
representación más precisa
del tema tratado, se
recomienda que los
lectores consulten el
artículo en su idioma
original.

OPEN ACCESS



Áreas Protegidas como sumideros de carbono en la ciudad de Río de Janeiro: propuesta metodológica y aplicación del modelo Carbon Storage and Sequestration del software InVEST 3.14

Protected Areas as carbon sinks in the Municipality of Rio de Janeiro: methodological proposal and application of the InVEST 3.14 carbon storage and sequestration model

Unidades de Conservação como sumidouros de carbono no Município do Rio de Janeiro: proposta metodológica e aplicação do modelo Carbon Storage and Sequestration do software InVEST 3.14

Beatriz Ambrosio Garcia de Oliveira¹, Victor Buznello de Vasconcelos Maluf², Paulo Vinicius Rufino Fevrier³

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Cidade Universitária, Rio de Janeiro/RJ, CEP: 21941-916, ORCID: 0000-0002-6264-4771, beaamgarcia@ufrj.br

²Instituto Estadual do Ambiente, Av. Marechal Floriano, 45, 11 andar, CEP: 20080-003, ORCID: 0000-0003-1323-2559, victormaluf@inea.rj.gov.br

³Instituto Estadual do Ambiente, Av. Marechal Floriano, 45, 11 andar, CEP: 20080-003, ORCID: 0000-0002-8854-7232, paulofevrier@inea.rj.gov.br

Resumen

Este estudio estimó las reservas de carbono en áreas protegidas del municipio de Río de Janeiro mediante el modelo CSS-InVEST, utilizando mapas detallados de uso y cobertura del suelo, suelos y fitofisionomías. La integración de estas bases mejoró la precisión de las estimaciones en los cuatro reservorios de carbono. Los resultados indican que los manglares y las áreas húmedas concentran las mayores reservas de carbono, seguidos por los macizos forestales. El trabajo evidencia el papel estratégico de las áreas protegidas urbanas en la mitigación del cambio climático y en la planificación ambiental.

Palabras clave: reserva de carbono; servicios ecosistémicos; mitigación climática; áreas protegidas urbanas.

Abstract

This study estimated carbon stocks in protected areas in the municipality of Rio de Janeiro using the CSS-InVEST model, based on detailed maps of land use and land cover, soils, and phytophysiognomies. The integration of these datasets improved the accuracy of estimates across the four carbon pools. The results indicate that mangroves and wetlands hold the largest carbon stocks, followed by forested massifs. The study highlights the strategic role of urban protected areas in climate change mitigation and environmental planning.

Keywords: carbon stock; ecosystem services; climate change mitigation; urban protected areas.

Resumo

Este estudo estimou os estoques de carbono em áreas protegidas no município do Rio de Janeiro por meio do modelo CSS-InVEST, utilizando mapas detalhados de uso e cobertura do solo, solos e fitofisionomias. A integração dessas bases aprimorou a precisão das estimativas nos quatro reservatórios de carbono. Os resultados indicam que manguezais e áreas úmidas concentram os maiores estoques, seguidos pelos maciços florestais. O trabalho evidencia o papel estratégico das áreas protegidas urbanas na mitigação das mudanças climáticas e no planejamento ambiental.

Palavras-chave: estoque de carbono, serviços ecossistêmicos; mitigação de mudanças climáticas; unidades de conservação urbanas.

1 Introducción

La intensificación del calentamiento global y el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera han impulsado a gobiernos e instituciones científicas a buscar estrategias eficaces de mitigación y adaptación al cambio climático. En este contexto, los bosques y otros ecosistemas naturales desempeñan un papel central como sumideros de carbono, al absorber y almacenar dióxido de carbono (CO₂) atmosférico en su biomasa y en los suelos, contribuyendo a la regulación del clima global (IPCC, 2019).

En el bioma Mata Atlántica, la literatura sobre el almacenamiento de carbono presenta avances importantes, abarcando desde evaluaciones de compartimentos específicos hasta síntesis de datos a escala regional. D'Andrea et al. (2015) estimaron los stocks de carbono orgánico del suelo en áreas de Restinga, considerando diferentes profundidades y aplicando métodos estadísticos para asegurar la confiabilidad muestral. Villanova et al. (2019) investigaron el stock de carbono en la necromasa en fragmentos de bosque secundario, mientras que Silva et al. (2021) analizaron el contenido de carbono en hojas y leño de especies arbóreas como indicador de calidad ambiental. A escala más amplia, Fonsêca et al. (2024) integraron datos publicados entre 2000 y 2021 mediante modelos mixtos y factores de conversión estandarizados, identificando patrones espaciales y climáticos que influyen en los stocks de carbono en el bioma.

A pesar de estos avances, gran parte de los estudios se concentra en compartimentos aislados o en escalas locales, existiendo aún vacíos en cuanto a la cuantificación integrada del stock total de carbono. En particular, son limitadas las evaluaciones que consideran simultáneamente los diferentes compartimentos de carbono y su distribución espacial en áreas protegidas, dificultando comparaciones consistentes entre regiones y la comprensión del papel de estas áreas en el contexto más amplio de la mitigación del cambio climático. Además, la ausencia de enfoques espacialmente explícitos restringe la aplicación de los resultados en procesos de planificación ambiental y en la formulación de políticas públicas basadas en evidencias.

En este sentido, en entornos urbanos densamente ocupados, donde la cobertura vegetal tiende a ser reducida, fragmentada y sometida a presiones antrópicas constantes, los remanentes forestales asumen importancia estratégica. Las Unidades de Conservación insertas en estos contextos contribuyen de forma significativa al mantenimiento de servicios ecosistémicos, al preservar áreas de vegetación nativa capaces de actuar como sumideros de carbono, además de desempeñar un papel fundamental en la regulación climática local y en la mejora de la calidad ambiental urbana (Amaral et al., 2026).

El municipio de Río de Janeiro, aunque marcado por una intensa urbanización, alberga diversos sistemas de áreas verdes (Pedreira; Andrade; Fico, 2017), gran parte protegidas por Unidades de Conservación municipales, estatales y federales, como el Parque Nacional de la Tijuca, el Parque Estatal de la Pedra Blanca y el Parque Natural Municipal de Marapendi. Este contexto convierte al municipio en un caso ejemplar para la evaluación del potencial de las UC urbanas en la provisión del servicio ecosistémico de stock de carbono, con implicaciones directas para la planificación territorial y la formulación de políticas públicas de mitigación del cambio climático.

Modelos basados en Sistemas de Información Geográfica, como el InVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*), han sido ampliamente empleados en la evaluación de servicios ecosistémicos por permitir estimaciones espacializadas, estandarizadas y comparables entre diferentes áreas y escalas, subsidiando procesos de toma de decisiones ambientales. En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo cuantificar, de forma estimada, y analizar el servicio ecosistémico de stock de carbono total (ECT) en ecosistemas terrestres protegidos por Unidades de Conservación del municipio de Río de Janeiro,

utilizando el modelo *Carbon Storage and Sequestration* del InVEST (versión 3.14), a fin de comprender el papel de estas áreas como sumideros de carbono.

2 Embasamento Teórico

2.1 La Comprensión del Ciclo del Carbono y sus Componentes

El ciclo del carbono comprende cuatro principales reservorios, siendo estos el carbono fósil, la atmósfera, el océano y la biosfera (IPCC, 2001; Schimel, 1995). La temática de este ciclo y su relación con el cambio climático, especialmente en relación con las fuentes y sumideros de CO₂ atmosférico, viene siendo discutida desde hace décadas, de forma que la literatura producida en este campo de conocimiento es vasta.

Aún en la década de 1990, Schimel (1995) señaló el hecho de que el ciclo del carbono se había convertido en punto focal en la ecología en función del drástico aumento observado de la concentración de CO₂ atmosférico, causado por el incremento de las emisiones globales. Al evaluar los principales resultados del Informe del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) de 1994, el autor resalta que los ecosistemas terrestres y su capacidad de regulación del ciclo del carbono recibieron gran atención por parte de los investigadores en aquella época, destacando la necesidad de una mejor comprensión de los mecanismos de almacenamiento. Estos, a su vez, involucran interacciones complejas entre clima (temperatura, humedad y radiación), vegetación (fotosíntesis y respiración), suelo y uso del suelo (Schimel, 1995).

En la misma coyuntura, Houghton (1995) alertó sobre el hecho de que los cambios en el uso de la tierra en ecosistemas terrestres ocurridos entre 1850 y 1980 se habían convertido en la segunda mayor fuente de emisiones de CO₂, solo por detrás de la quema de combustibles fósiles. Asimismo, el autor resaltó que tal fenómeno se había desacelerado en las regiones templadas y boreales del hemisferio norte en el siglo XX, pero se había intensificado rápidamente en las regiones tropicales mediante la conversión de bosques en áreas de pasto y agricultura, lo que indicaba la tendencia de liberación de CO₂ por parte de los ecosistemas terrestres (Houghton, 1995).

En 2006, el IPCC definió que el carbono circula por tres sumideros (pools) principales en la biosfera terrestre: biomasa, materia orgánica muerta y suelos (IPCC, 2006; 2019). El primero comprende la biomasa sobre el suelo, compuesta por toda la biomasa viva arbórea, herbácea y arbustiva, y la biomasa bajo el suelo, que abarca raíces vivas de más de 2 mm de diámetro. En cuanto a la materia orgánica muerta, incluye biomasa leñosa muerta, en pie o caída, en la superficie con diámetro superior a 10 cm, así como hojarasca. En el suelo, el carbono adopta la forma de carbono orgánico, que es función directa de la materia orgánica viva y no viva en su matriz.

Además, es necesario separar los mecanismos de secuestro y de stock de carbono, ya que consisten en procesos complementarios, pero distintos, de asimilación del carbono atmosférico. Según el IPCC (2001), el secuestro de carbono es el proceso de aumento de la cantidad de carbono en un reservorio que no sea la atmósfera. En el caso de mecanismos biológicos, como la fotosíntesis, es la extracción directa de CO₂ atmosférico por la biosfera. Por otro lado, el órgano define stock como la cantidad absoluta de carbono retenida en un reservorio, en un momento específico (IPCC, 2001).

Para el caso específico del sumidero del suelo, Don et al. (2023), al revisar 100 publicaciones científicas entre abril y octubre de 2022, identificaron confusión en la utilización de ambos términos y su relación con la mitigación del cambio climático, resaltando la necesidad de estandarización conceptual. Los autores propusieron que el término stock de carbono se refiera específicamente a la cantidad o contenido de carbono orgánico en el suelo, siendo sinónimo de almacenamiento de

carbono orgánico, expresado en unidades de masa por área (ej: $\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ o $\text{TonC}\cdot\text{ha}^{-1}$). El secuestro de carbono, por su parte, debe referirse al proceso de transferencia del carbono desde la atmósfera, vía actividades metabólicas de autótrofos y posterior producción de materia orgánica, hacia el suelo, donde es retenido como carbono orgánico. Este flujo debe expresarse en unidades de masa por área por período de tiempo (ej: $\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ o $\text{TonC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$).

Asimismo, Don et al. (2023) reiteran que el secuestro solo resulta en aumento, o acumulación, del stock de carbono en el suelo si las ganancias derivadas de la extracción de CO_2 de la atmósfera superan las pérdidas de carbono por respiración de organismos en la descomposición de la materia orgánica. De esta forma, la protección de grandes stocks de carbono orgánico en el suelo es una medida de mitigación del cambio climático en el sentido de impedir que dicho carbono sea nuevamente liberado a la atmósfera. En este caso, el carbono orgánico, conforme a lo definido por el IPCC (2006), puede ser almacenado en cuatro diferentes reservorios: en el suelo; y en la biomasa, siendo esta dividida en biomasa aérea/sobre el suelo, biomasa subterránea/bajo el suelo, y biomasa muerta/materia muerta/hojarasca.

Con relación a la retención de carbono en el suelo, Antunes et al. (2025), en una revisión de literatura aún más reciente, señalan que la materia orgánica, materia prima para el carbono orgánico, deriva de la deposición de residuos de plantas y animales directamente en la superficie (hojarasca), que son posteriormente transformados en compuestos orgánicos y transportados hacia capas más profundas del suelo, donde son retenidos vía mecanismos físico-químicos.

En este sentido, los autores resaltan que la fracción fina de la mineralogía de los suelos, especialmente la arcilla, tiene un papel importante en la formación de agregados en presencia de materia orgánica. Estos minerales poseen capacidad de retener agua y componentes orgánicos e inorgánicos, así como adsorber materia orgánica disuelta en función de su área específica y capacidad de intercambio catiónico. A través de asociaciones y agregaciones con compuestos minerales y orgánicos, la materia orgánica es estabilizada, evitando que sus moléculas sean mineralizadas u oxidadas, de modo que permanece retenida en el suelo (Antunes et al., 2025).

De esta forma, en este trabajo se considera la definición dada por la *Food and Agriculture Organization* (FAO), donde el stock de carbono del suelo es la masa de carbono orgánico contenida en una muestra de densidad aparente conocida, generalmente expresada en toneladas o megagramos por hectárea para una determinada profundidad, que debe reportarse hasta 30 cm, de acuerdo con las recomendaciones del IPCC (IPCC, 2006; FAO, 2019).

Utilizando tales recomendaciones, Bernoux et al. (2002) cuantificaron y mapearon el stock de carbono en suelos brasileños a partir de perfiles de suelo recolectados durante el proyecto RADAMBRASIL, del mapa digital de suelos elaborado por la FAO (2019) y de información de cobertura vegetal nativa. Los autores observaron que los mayores stocks de carbono ocurrían en las regiones con mayor presencia de suelos húmedos, como el Pantanal, y suelos de manglar, mientras que los menores stocks se observaron en suelos arenosos en clima semiárido, como en el noreste brasileño.

Con relación a la biomasa, esta engloba todo material orgánico, como ramas, tronco y hojas (biomasa aérea), raíces (biomasa subterránea), materia muerta y hojarasca (necromasa). Fonsêca et al. (2024) revisaron 46 publicaciones en el período de 2000 a 2021 que trataron sobre el stock de carbono en la biomasa del ecosistema Mata Atlántica, considerando bosques maduros y secundarios, así como su diversidad fitofisionómica. Según los autores, la biomasa posee tres veces menos capacidad de almacenar carbono en comparación con el suelo y, entre sus distintos reservorios, la biomasa aérea (arbórea) representa la fracción más considerable en los ecosistemas forestales maduros en relación con los bosques

secundarios.

Aún según Fonsêca et al. (2024), el carbono almacenado en la biomasa aérea puede alcanzar hasta $202.8 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$, con variaciones significativas entre bosques maduros y secundarios, y hasta $31 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ en la necromasa. De esta forma, se resalta la importancia de los esfuerzos de conservación de remanentes de bosques maduros en el bioma Mata Atlántica, ya que una hectárea de bosque en estado sucesional avanzado puede almacenar el doble que un bosque en regeneración. Además, los autores señalan que factores climáticos como la precipitación y la temperatura afectan directamente la capacidad de stock, en donde bosques sujetos a regímenes pluviométricos más elevados mostraron mayores stocks de carbono.

Sin embargo, esta capacidad no es uniforme, siendo susceptible a variaciones ambientales y antrópicas. La estacionalidad constituye un factor ambiental importante, ya que la conversión de la biomasa aérea en necromasa implica liberación gradual del carbono que no es retenido por el suelo de vuelta a la atmósfera debido a la descomposición (Veiga, 2008).

Por último, es necesario señalar que los cambios en el uso y cobertura del suelo alteran, desde hace décadas, el stock de carbono en la biomasa y en el suelo (Houghton, 1995; Houghton, 2009). La deforestación constituye un factor antrópico en el cual la tala rasa, seguida de la quema para limpieza del terreno, promueve la liberación total del carbono previamente almacenado hacia la atmósfera (Gameiro et al., 2025). La pérdida de carbono por la conversión de ecosistemas forestales de Mata Atlántica en pastizales y áreas agrícolas es del 65% (Fonseca et al., 2024).

2.2 Usos y Coberturas del Suelo y la Capacidad de Almacenamiento de Carbono

La comprensión del stock de carbono por clase de uso y cobertura del suelo requiere un análisis detallado de las características físicas, químicas, morfológicas y biológicas del ambiente. Este enfoque permite comprender el funcionamiento de los mecanismos de almacenamiento de carbono en las diferentes coberturas, desconsiderándose la influencia de factores antrópicos. Según las directrices del IPCC (2006), pueden identificarse tres categorías principales:

i. Clases con almacenamiento de carbono despreciable

Las áreas urbanas, los suelos expuestos y las áreas de minería configuran usos de la tierra de carácter antrópico que presentan capacidad despreciable de almacenamiento de carbono orgánico, en función de la ausencia o extrema limitación de cobertura vegetal y de materia orgánica en el suelo. Son, por tanto, asociadas a stock de carbono nulo. De forma semejante, los afloramientos rocosos y los cuerpos de agua, aunque naturales, presentan restricciones metodológicas para la cuantificación de stocks de carbono en el contexto de inventarios territoriales, en razón de la escasez de datos empíricos consolidados en la literatura (BRASIL, 2024).

ii. Clases con capacidad de almacenamiento de carbono, pero con alta dinamicidad

Los pastizales, los cultivos agrícolas y las silviculturas se configuran como áreas antrópicas dinámicas, sujetas a estacionalidades y períodos de cosecha y corte, y cuyo potencial de almacenamiento de carbono depende tanto de las características del suelo como del tipo de manejo empleado (Phukubye et al., 2022; Beillouin et al., 2022). De esta forma, la capacidad de almacenamiento en estas clases está directamente relacionada con factores como prácticas agropecuarias y uso del suelo. En virtud de esta dinamicidad, la estimación del stock de carbono presenta mayor complejidad e incertidumbre, variando considerablemente entre diferentes regiones e incluso dentro de un mismo estado.

iii. Clases con capacidad de almacenamiento de carbono, pero con baja dinamicidad

Las áreas de vegetación natural, como bosques, manglares, restingas y áreas húmedas, se caracterizan por una dinámica relativamente estable frente a las mencionadas anteriormente, lo que las hace menos susceptibles a variaciones significativas en el stock de carbono. En estos casos, se consideraron las estimaciones provenientes de estudios nacionales (BRASIL, 2020).

2.3 Modelamiento Espacial

El modelamiento espacial se ha consolidado como una herramienta fundamental para el estudio del ciclo del carbono, especialmente en lo que se refiere a la estimación de stocks y flujos en diferentes usos y coberturas de la tierra. Actualmente, diversos softwares han sido desarrollados con esta finalidad, entre los cuales se destaca el *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs* (InVEST), ampliamente utilizado por la comunidad académica. El modelo *Carbon Storage and Sequestration* (InVEST-CSS) posibilita la estimación del stock de carbono para los cuatro reservorios, asociados a clases específicas de uso y cobertura de la tierra. Adicionalmente, el modelo permite la realización de balances de secuestro y emisión de carbono con base en la comparación entre mapas de uso de la tierra de diferentes años, así como la valoración económica del carbono almacenado o secuestrado.

Nogueira Júnior (2023) aplicó el InVEST-CSS para el mapeamiento y la valoración económica del carbono en la Amazonía, utilizando datos secundarios de suelo y biomasa (sobre y bajo el suelo) integrados a mapas de uso y cobertura de la tierra. Los resultados destacaron el elevado potencial de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales y bosques secundarios, además de evidenciar la capacidad del modelo para estimar el valor monetario del carbono secuestrado, considerando tanto el costo social del carbono como escenarios de crédito de mercado.

He et al. (2023) acoplaron el modelo de simulación *Future Land Use Simulation* (FLUS) al InVEST con el objetivo de proyectar los stocks de carbono en el municipio de Guilin, China, hasta el año 2035, bajo cuatro escenarios alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Los autores observaron que, aunque el proceso de urbanización haya resultado en pérdidas significativas de carbono en el período entre 2005 y 2020, el escenario de “prioridad ecológica” proyectado para 2035 presentó el mayor potencial de almacenamiento de carbono, superando los escenarios orientados predominantemente por el crecimiento económico.

De forma semejante, Zafar et al. (2024) integraron el modelo CA-Markov para la simulación de escenarios futuros (2025 y 2030) al InVEST-CSS, evaluando la dinámica de los stocks de carbono en Pakistán a lo largo de tres décadas. Los resultados indicaron un aumento modesto (0,5%) en el stock total de carbono hasta 2030, impulsado principalmente por la expansión de áreas forestales y tierras cultivadas, siendo el carbono orgánico del suelo responsable de aproximadamente el 94% del stock total estimado.

A pesar de su amplia aplicabilidad y facilidad de uso, Wang et al. (2024) señalaron que, en entornos urbanos complejos y altamente fragmentados, el desempeño espacial del InVEST puede ser inferior al de otros modelos, como el *Carnegie–Ames–Stanford Approach* (CASA), ya que el enfoque basado en densidades fijas de carbono no representa adecuadamente la dinámica estacional de la vegetación. En contrapartida, Nwaogu et al. (2025) destacaron el potencial del InVEST para integrar stocks de carbono provenientes de diferentes compartimentos del suelo y subsidiar la formulación de políticas públicas. De modo complementario, Sharma et al. (2024) resaltaron la robustez del modelo al ofrecer un método simple y consistente para la construcción de líneas de base a escala urbana, contribuyendo a la planificación territorial sostenible.

3 Área de Estudio

El municipio de Río de Janeiro se localiza en la región Sudeste de Brasil, entre los paralelos 22°46'1.84"S y 23°4'56.56"S y los meridianos 43°6'37.85"O y 43°47'42.59"O, con un área aproximada de 1.200 km² (IBGE, 2022). Presenta clima tropical húmedo y relieve diversificado, marcado por la presencia de macizos costeros, planicies litoráneas y sistemas lagunares, elementos que condicionan la distribución de los ecosistemas naturales y de los suelos en el territorio municipal (Ab'Sáber, 2003).

El municipio alberga un conjunto expresivo de unidades de conservación (UC) públicas de las esferas municipal, estatal y federal, que protegen remanentes significativos de Mata Atlántica, manglares, restingas y áreas húmedas. Tales áreas protegidas representan aproximadamente el 30% del área total del municipio, configurándose como elementos estructurantes del paisaje urbano y periurbano y desempeñando un papel fundamental en la provisión de servicios ecosistémicos, especialmente en la regulación climática y en el stock de carbono, incluso en un contexto de elevada urbanización y fragmentación ambiental (Mendonça-Santos et al., 2003).

Las informaciones relativas al límite territorial, categoría y esfera administrativa de estas unidades fueron obtenidas a partir de bases de datos oficiales, incluyendo registros institucionales y bases cartográficas disponibles por órganos ambientales y plataformas públicas de datos geospaciales, tales como el Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (MMA, 2026), y el Geoinea (INEA, 2018). La relación de las unidades de conservación consideradas en el estudio y su distribución espacial se encuentran presentadas en la Figura 1 y en la Tabla 1.

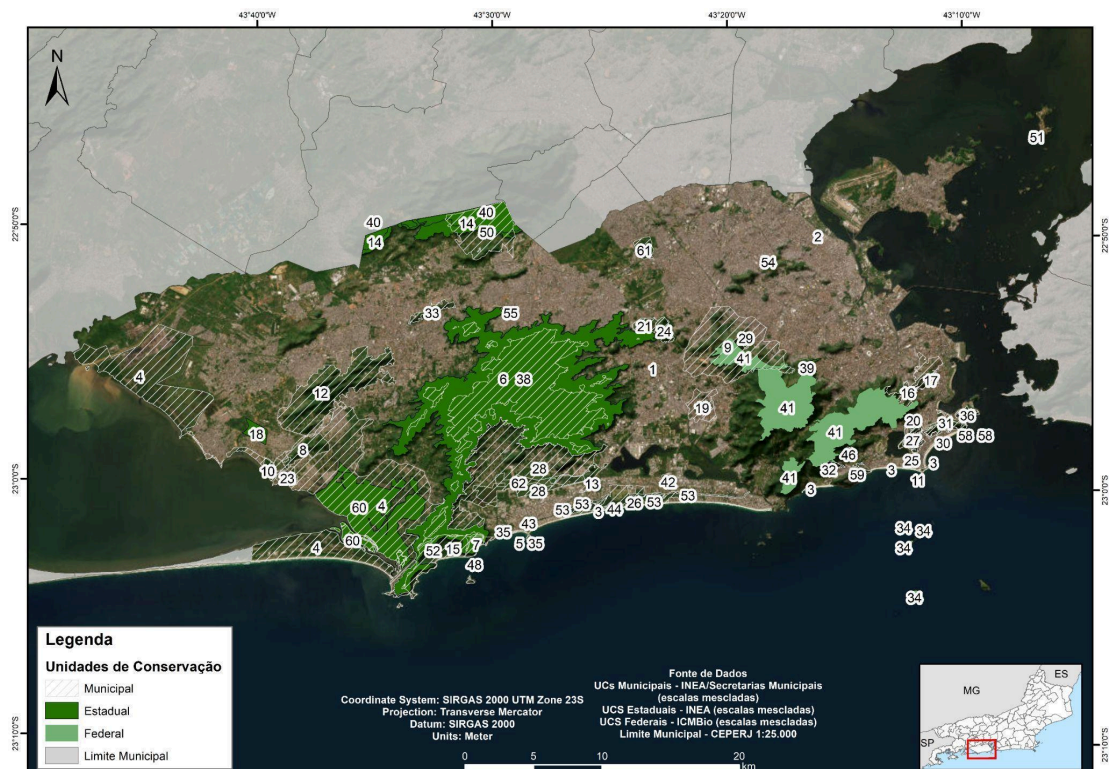


Figura 1: Unidades de Conservação públicas municipales, estatales y federales insertas en el municipio de Río de Janeiro.

Fuente: Autores

Tabla 1: Lista de las Unidades de Conservación públicas del municipio de Río de Janeiro.

| ID | Nombre de la UC ¹ | Esfera | Cód. CNUC | Área (ha) |
|----|--|-----------|--------------|-----------|
| 1 | APA da Fazenda da Taquara | Municipal | 0455.33.1783 | 8,69 |
| 2 | APA da Fazendinha da Penha | Municipal | No consta | 13,24 |
| 3 | APA da Orla Marítima | Municipal | 0455.33.1793 | 127,98 |
| 4 | APA da Orla Marítima da Baía de Sepetiba | Municipal | 0455.33.1777 | 11.297,83 |
| 5 | APA da Paisagem e do Areal da Praia do Pontal | Municipal | 0455.33.1791 | 16,06 |
| 6 | APA da Pedra Branca | Municipal | 0455.33.1795 | 5.386,73 |
| 7 | APA da Prainha | Municipal | 0455.33.1796 | 150,27 |
| 8 | APA da Serra da Capoeira Grande | Municipal | 0455.33.1764 | 478,88 |
| 9 | APA da Serra dos Pretos Forros | Municipal | 0455.33.1797 | 2.715,13 |
| 10 | APA das Brisas | Municipal | 0455.33.1767 | 100,43 |
| 11 | APA das Pontas de Copacabana e Arpoador e Seus Entorno | Municipal | 0455.33.1824 | 16,16 |
| 12 | APA das Serras de Inhoaíba, Cantagalo E Santa Eugênia | Municipal | 0455.33.4378 | 2.227,73 |
| 13 | APA das Tabebuias | Municipal | 0455.33.1787 | 61,75 |
| 14 | APA de Gericino-Mendanha | Estadual | 0000.33.0735 | 1.490,04 |
| 15 | APA de Grumari | Municipal | 0455.33.1823 | 928,61 |
| 16 | APA de Santa Teresa | Municipal | No consta | 515,72 |
| 17 | APA de São José | Municipal | 0455.33.1825 | 108,89 |
| 18 | APA de Sepetiba li | Estadual | 0000.33.1837 | 171,61 |
| 19 | APA do Bairro da Freguesia | Municipal | 0455.33.1784 | 379,49 |
| 20 | APA do Morro da Saudade | Municipal | 0455.33.1817 | 59,47 |
| 21 | APA do Morro do Cachambi | Municipal | No consta | 142,41 |
| 22 | APA do Morro do Leme | Municipal | 0455.33.1799 | 48,74 |
| 23 | APA do Morro do Silvério | Municipal | 0455.33.1766 | 150,12 |
| 24 | APA do Morro do Valqueire | Municipal | 0455.33.1782 | 166,08 |
| 25 | APA do Morro dos Cabritos | Municipal | 0455.33.1816 | 135,46 |
| 26 | APA do Parque Municipal Ecológico de Marapendí | Municipal | 0455.33.1788 | 938,42 |
| 27 | APA do Sacopã | Municipal | 0455.33.1820 | 248,55 |
| 28 | APA do Sertão Carioca | Municipal | 0455.33.4295 | 3.247,43 |
| 29 | APA do Várzea Country Club | Municipal | 0455.33.1822 | 10,30 |

¹Categorías del SNUC - APA: Área de Protección Ambiental; ARIE: Área de Relevante Interés Ecológico; MONA: Monumento Natural; PE: Parque Estatal; PN: Parque Nacional; PNM: Parque Natural Municipal; REVIS: Refugio de Vida Silvestre; REBIO: Reserva Biológica.

| ID | Nombre de la UC | Esfera | Cód. CNUC | Área (ha) |
|-----------|---|---------------|------------------|------------------|
| 30 | APA dos Morros da Babilônia E de São João | Municipal | 0455.33.1798 | 112,67 |
| 31 | APA Paisagem Carioca | Municipal | 0455.33.2903 | 160,89 |
| 32 | ARIE de São Conrado | Municipal | 0455.33.1826 | 82,27 |
| 33 | ARIE Floresta da Posse | Municipal | 0455.33.4379 | 171,56 |
| 34 | MONA do Arquipélago das Ilhas Cagarras | Federal | 0000.00.0034 | 76,47 |
| 35 | MONA do Recreio dos Bandeirantes | Municipal | 4557.33.4879 | 62,75 |
| 36 | MONA dos Morros do Pão de Açúcar e Urca | Municipal | 0455.33.1811 | 86,42 |
| 37 | PE da Chacrinha | Estadual | No consta | 3,71 |
| 38 | PE da Pedra Branca | Estadual | 0000.33.1478 | 12.491,72 |
| 39 | PE do Grajaú | Estadual | No consta | 54,73 |
| 40 | PE do Mendanha | Estadual | 0000.33.2904 | 967,11 |
| 41 | PN da Tijuca | Federal | 0000.00.0154 | 3.958,39 |
| 42 | PN Bosque da Barra | Municipal | 0455.33.1786 | 54,40 |
| 43 | PNM Chico Mendes | Municipal | 0455.33.1790 | 40,65 |
| 44 | PNM da Barra da Tijuca Nelson Mandela | Municipal | No consta | 162,65 |
| 45 | PNM da Catacumba | Municipal | 0455.33.1763 | 97,66 |
| 46 | PNM da Cidade | Municipal | 0455.33.1802 | 46,65 |
| 47 | PNM da Freguesia | Municipal | 0455.33.1785 | 29,22 |
| 48 | PNM da Prainha | Municipal | 0455.33.1803 | 141,27 |
| 49 | PNM da Serra da Capoeira Grande | Municipal | 0455.33.1765 | 20,99 |
| 50 | PNM da Serra do Mendanha | Municipal | 0455.33.1769 | 1.390,31 |
| 51 | PNM Darke de Mattos | Municipal | 0455.33.1801 | 5,10 |
| 52 | PNM de Grumari | Municipal | 0455.33.1827 | 775,82 |
| 53 | PNM de Marapendi | Municipal | 0455.33.1789 | 155,61 |
| 54 | PNM do Jardim do Carmo | Municipal | 0455.33.1814 | 2,55 |
| 55 | PNM Fazenda do Viegas | Municipal | 0455.33.1778 | 8,49 |
| 56 | PNM Fonte da Saudade | Municipal | 0455.33.1807 | 2,22 |
| 57 | PNM José Guilherme Merquior | Municipal | 0455.33.1805 | 8,29 |
| 58 | PNM Paisagem Carioca | Municipal | 0455.33.2868 | 138,10 |
| 59 | PNM Penhasco Dois Irmãos - Arquiteto Sérgio Bernardes | Municipal | 0455.33.1800 | 36,91 |
| 60 | REBIO Estadual de Guaratiba | Estadual | 0000.33.1482 | 2.815,68 |
| 61 | REVIS da Floresta do Camboatá | Municipal | 0455.33.4351 | 171,58 |
| 62 | REVIS dos Campos de Sernambetiba | Municipal | 0455.33.4350 | 556,97 |

Fuente: Autores.

4 Materiales y Métodos

El presente estudio utilizó como herramienta el modelo *Carbon Storage and Sequestration*, disponible públicamente en la plataforma InVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*), desarrollado por el *Natural Capital Alliance* (NCA, 2016). Este modelo tiene como objetivo estimar la cantidad de carbono almacenado en los cuatro reservorios: biomasa sobre el suelo; biomasa bajo el suelo; biomasa muerta; y en el suelo propiamente dicho.

El modelo necesita dos datos de entrada principales: un mapa en formato ráster del uso y cobertura del suelo del área de estudio; y una tabla biofísica en formato csv en la cual se almacenan informaciones de stock de carbono para cada clase del mapa de entrada en los cuatro reservorios. Sin embargo, el carácter simplificado del modelo demanda que los datos de entrada sean bien detallados, robustos y consistentes, de modo a representar adecuadamente la complejidad del paisaje.

Para ello, se creó un mapa de unidades del paisaje mediante el cruce de los mapas de uso y cobertura del suelo, tipos de suelo y vegetación potencial del área de estudio. El resultado de esta etapa se denominó Uso-Suelo-Vegetación (USV), en donde para cada unidad individual se asociaron los potenciales de stock de carbono de los datos de entrada originales.

Siendo así, para alcanzar este objetivo se condujeron los siguientes procesos metodológicos:

- 1) Refinamiento del mapeo de uso y cobertura del suelo tradicional mediante técnicas de sensoriamiento remoto y *Deep Learning*;
- 2) Creación de una base de datos conteniendo los valores de ECT para cada uso y cobertura del suelo del municipio de Río de Janeiro, incluyendo las variaciones fitofisionómicas de la vegetación determinadas por el mapa de vegetación potencial;
- 3) Cálculo del stock de carbono a 30 cm para los tipos de suelos del municipio de Río de Janeiro a partir de perfiles de suelos de bases de datos públicas;
- 4) Creación de unidades de paisaje Suelo-Uso-Vegetación mediante el cruce de las capas de uso y cobertura del suelo, clases de suelo y vegetación potencial;
- 5) Creación de la tabla biofísica final a partir de datos de la literatura referentes a las biomásas sobre y bajo el suelo y a la materia muerta; valores estimados para el carbono del suelo, obtenidos mediante cálculos directos a partir de los perfiles de suelo disponibles.

Los productos finales consistieron en un mapa en formato ráster que expresa la distribución espacial del carbono total almacenado en el paisaje, considerando la suma de los cuatro reservorios, y un mapa que demuestra el stock de carbono por hectárea (tonC/ha) en cada unidad de conservación pública inserta en el municipio.

4.1 Refinamiento del mapa de Uso y Cobertura del Suelo

El dato geoespacial en formato ráster de uso y cobertura del suelo utilizado en este estudio fue obtenido a partir de la colección 9.1 de la plataforma MapBiomás², correspondiente al año 2023. En este mapeo, se identificaron 14 clases de uso y cobertura presentes en el municipio de Río de Janeiro, conforme se presenta en la Tabla 2.

² Proyecto MapBiomás – Colección 9.1 de la Serie Anual de Mapas de Cobertura y Uso de la Tierra de Brasil, accedido en 2025, a través del enlace: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>

Tabla 2: Clases de Uso y Cobertura del Suelo

| Clase | Área (ha) |
|--------------------------|-----------|
| Bosque | 24.724,77 |
| Manglar | 3.062,45 |
| Áreas Húmedas | 3.166,73 |
| Pastizal | 5.830,30 |
| Mosaico de Usos | 18.537,76 |
| Cuerpos Arenosos | 378,22 |
| Áreas Urbanas | 57.002,36 |
| Otras áreas no vegetadas | 610,92 |
| Afloramiento Rocoso | 135,68 |
| Minería | 27,40 |
| Acuicultura | 14,68 |
| Apicum | 752,64 |
| Cuerpos Hídricos | 1.815,1 |
| Restinga Arbórea | 3.940,35 |

Fuente: MapBiomias

Para el refinamiento en la base de datos de uso y cobertura del suelo se realizaron algunos procedimientos de geoprocésamiento. Primeramente, la clase de “Bosque” fue mejorada a partir del mapeo de vegetación a escala de mayor detalle efectuado por el INEA (en prensa), en el cual se aplicaron algoritmos de *Deep Learning* al mosaico de imágenes *Planet NCFI* para el mes de agosto de 2024. Tal procedimiento resultó en un mapa de la vegetación existente en el Estado de Río de Janeiro en el año 2024, en escala aproximada de 1:25.000. Esta base detallada fue recortada para el municipio de Río de Janeiro, e incorporada al mapeo del MapBiomias, lo que permitió la identificación de fragmentos de áreas verdes intraurbanas, ampliando la precisión de la representación espacial de la vegetación.

Seguidamente, la clase “Restinga Arbórea” pasó por un proceso de validación a partir de la fotointerpretación y previo conocimiento de su distribución espacial en el municipio. Fue necesario realizar esta etapa ya que en el mapeo original del MapBiomias se identificaron errores de comisión en relación con esta cobertura vegetal. Durante esta etapa de verificación, también fueron revisadas y corregidas, también mediante fotointerpretación, las clases de Manglar, Áreas Húmedas, Mosaico de Usos, y Pastizal. Adicionalmente, se identificaron áreas de agricultura que no habían sido mapeadas originalmente por el MapBiomias para el municipio.

Debido a las dos etapas descritas anteriormente, algunas clases sufrieron reducción en sus áreas. Por ejemplo, la clase “Mosaico de Usos”, originalmente clasificada por el MapBiomias para áreas donde no fue posible la determinación precisa de su cobertura, tuvo una reducción de 17 mil hectáreas. De esta manera, después del proceso de refinamiento, el mapeo final de Uso y Cobertura del Suelo pasó a contemplar 15 clases, cuyas respectivas áreas se encuentran presentadas en la Tabla 3.

Tabla 3: Uso y Cobertura del Suelo Refinado

| Clase | Área (ha) | Diferencia en relación con el área original del MapBiomias (ha) |
|--------------------------|-----------|---|
| Bosque | 42.096,96 | + 17.372,19 |
| Manglar | 4.941,70 | + 1.879,25 |
| Áreas Húmedas | 6.228,20 | + 3.063,36 |
| Pastizal | 3.379,54 | - 2.447,14 |
| Agricultura | 885,77 | + 885,77 |
| Mosaico de Usos | 1.194,32 | - 17.343,45 |
| Cuerpos Arenosos | 379,96 | + 1,74 |
| Áreas Urbanas | 55.812,94 | - 1.189,41 |
| Otras áreas no vegetadas | 592,39 | - 18,53 |
| Afloramiento Rocoso | 129,13 | - 6,55 |
| Minería | 27,45 | + 0,05 |
| Acuicultura | 14,61 | - 0,07 |
| Apicum | 759,84 | + 7,47 |
| Cuerpos Hídricos | 1.624,6 | - 189,52 |
| Restinga Arbórea | 781,69 | - 3.159,14 |

Fuente: Autores, adaptado de MapBiomias

4.1.1 Unidades de paisaje Uso-Suelo-Vegetación

Comprendiendo que el stock de carbono está directamente relacionado con las características físicas, químicas y biológicas del ambiente, se procedió al refinamiento de las clases de uso y cobertura del suelo mediante el proceso de incorporación de informaciones sobre los tipos de suelos y fitofisionomías potenciales de la vegetación para el municipio. Para ello, se utilizaron capas de datos geoespaciales provenientes de órganos oficiales, en las mejores escalas disponibles.

La capa referente a los tipos de suelo fue derivada del Mapeamiento Pedológico-Geotécnico del Municipio de Río de Janeiro (Lumbreras; Gomes, 2004), en la escala 1:75.000. Las clases de suelos fueron agrupadas conforme a la metodología propuesta por Bernoux et al. (2002), la cual considera parámetros como actividad de la arcilla, granulometría y tenor de humedad para organizarlos según el potencial de almacenamiento de carbono.

La Tabla 4 presenta los tipos de suelos identificados y sus respectivos grupos de clasificación. La opción de trabajar con grupos de suelos, en lugar de unidades edafológicas individuales, buscó minimizar vacíos de levantamientos de campo relacionados con determinados tipos de suelo, sus atributos físico-químicos y los usos de la tierra a ellos asociados.

Tabla 4: Clases de solos agrupados

| Grupo de Suelos | Característica de los suelos de este grupo | Suelos pertenecientes al grupo |
|-----------------------------------|---|---|
| HAC Suelos | Suelos no latossólicos que poseen alta actividad de arcilla (<i>Ta</i>) | Cambisol, Chernosol, Luvisol |
| LAC no-Latossolos | Suelos no latossólicos que poseen baja actividad de arcilla (<i>Tb</i>) | Argisol, Cambisol, Neosolo lítico, Nitosol |
| LAC Latossolos | Suelos latossólicos (naturalmente bajos en actividad de arcilla) | Latosol |
| Sandy Suelos | Suelos arenosos | Espodosolo, Neosolo Cuarzarenico |
| Wet Suelos | Suelos húmedos, anegados | Gleisol, Cambisol flúvico, neosolo flúvico, Plintosol |
| Otros Suelos | Otros, que no encajan en las categorías anteriores | Gleisol Salino, Planosol |
| Organossolos | Suelos ricos en materia orgánica | Organosol |
| Suelos Indiscriminados de Manglar | Suelos de ambientes estuarinos; manglares | Suelos Indiscriminados de Manglar |

Fuente: Adaptado de Bernoux *et al.* (2002)

Por último, la base cartográfica de fitofisionomía fue obtenida a partir del Mapeamiento de Vegetación Potencial, en escala 1:100.000, para todo el estado de Río de Janeiro en el contexto de la publicación “El Estado del Ambiente” (INEA, 2010). A pesar de que existe el mapeo de la cobertura vegetal y uso del suelo del municipio de Río de Janeiro para el año 2018, en escala 1:10.000 (PCRJ, 2018), se optó por utilizar la producción de INEA (2010) ya que las clases de vegetación están estandarizadas según el Inventario Nacional (BRASIL, 2016), que, a su vez, usa la metodología del Manual Técnico de la Vegetación Brasileña del IBGE (2012).

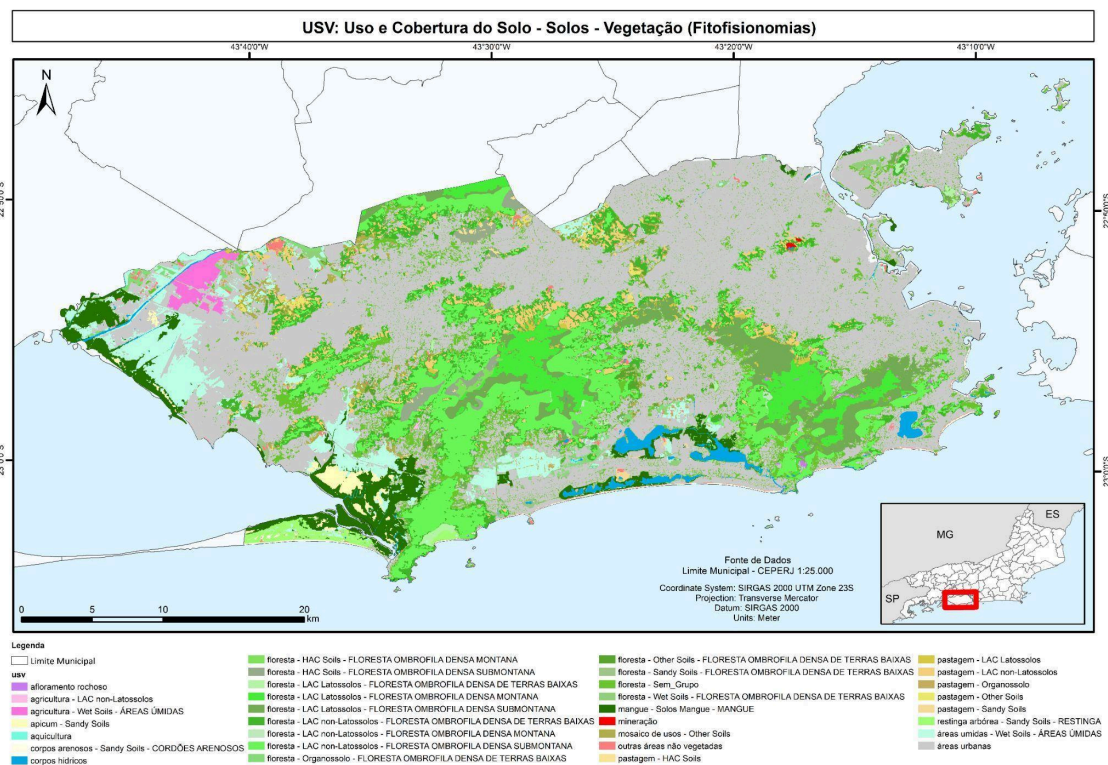


Figura 2 - Unidades de paisaje Uso-Suelo-Vegetación en Río de Janeiro

Fuente: Autores.

En razón de las diferencias de escala entre las bases utilizadas, el cruce de los tres conjuntos de datos demandó ajustes cartográficos para garantizar la consistencia topológica. En los casos en que ocurrieron polígonos inconsistentes después del proceso de intersección, se empleó la herramienta *Eliminate*, disponible en el software ArcGIS Pro, la cual elimina polígonos seleccionados según la regla del vecino más próximo de mayor área. El producto final resultó en 33 unidades de paisaje USV, representadas en la Figura 2 y en la Tabla 5.

Tabla 5: Unidades de Paisagem Uso-Solo-Vegetação

| Código | Unidad de Paisaje | Área (ha) |
|--------|--|-----------|
| 1 | Afloramiento rocoso | 129,12 |
| 2 | Agricultura - LAC no-Latossolos | 12,69 |
| 3 | Agricultura - Wet Suelos | 872,75 |
| 4 | Apicum - Sandy Suelos | 759,88 |
| 5 | Acuicultura | 14,6 |
| 6 | Áreas húmedas - Wet Suelos | 6.228,20 |
| 7 | Áreas urbanas | 55.806,41 |
| 8 | Cuerpos arenosos - Sandy Suelos | 379,9 |
| 9 | Cuerpos hídricos | 1.624,69 |
| 10 | Bosque - HAC Suelos - Bosque Ombrófilo Denso Montana | 151,1 |
| 11 | Bosque - HAC Suelos - Bosque Ombrófilo Denso Submontana | 939,8 |
| 12 | Bosque - LAC Latossolos - Bosque Ombrófilo Denso de Tierras Bajas | 483,12 |
| 13 | Bosque - LAC Latossolos - Bosque Ombrófilo Denso Montana | 3.937,57 |
| 14 | Bosque - LAC Latossolos - Bosque Ombrófilo Denso Submontana | 5.688,43 |
| 15 | Bosque - LAC no-Latossolos - Bosque Ombrófilo Denso de Tierras Bajas | 7.215,84 |
| 16 | Bosque - LAC no-Latossolos - Bosque Ombrófilo Denso Montana | 79,47 |
| 17 | Bosque - LAC no-Latossolos - Bosque Ombrófilo Denso Submontana | 12.317,5 |
| 18 | Bosque - Organosol - Bosque Ombrófilo Denso de Tierras Bajas | 859,05 |
| 19 | Bosque - Other Suelos - Bosque Ombrófilo Denso de Tierras Bajas | 526,83 |
| 20 | Bosque - Sandy Suelos - Bosque Ombrófilo Denso de Tierras Bajas | 231,75 |
| 21 | Bosque - Sin grupo de suelos (áreas urbanas) | 9.230,17 |
| 22 | Bosque - Wet Suelos - Bosque Ombrófilo Denso de Tierras Bajas | 427,82 |
| 23 | Manglar - Suelos Indiscriminados de Manglar - Manglar | 4.940,29 |
| 24 | Minería | 27,45 |
| 25 | Mosaico de usos - Otros Suelos | 1.194,01 |
| 26 | Otras áreas no vegetadas | 575,76 |
| 27 | Pastizal - HAC Suelos | 78,52 |
| 28 | Pastizal - LAC Latossolos | 335,73 |
| 29 | Pastizal - LAC no-Latossolos | 2.370,52 |
| 30 | Pastizal - Organosol | 118,07 |
| 31 | Pastizal - Other Suelos | 391,90 |
| 32 | Pastizal - Sandy Suelos | 84,1 |
| 33 | Restinga arbórea - Sandy Suelos - Restinga | 781,45 |

Fuente: Autores

4.2 Stock de carbono en los cuatro reservorios de carbono

Para la estimación del stock de carbono en los reservorios de biomasa sobre el suelo, biomasa bajo el suelo y materia muerta/hojarasca, se utilizaron valores de referencia obtenidos en artículos científicos, inventarios y reportes nacionales (BRASIL, 2016; BRASIL, 2020; Zanatta et al., 2020; Mendonça-Santos et al., 2003; Santos, 2015; Mello et al., 2006), con énfasis en el estado de Río de Janeiro y en el bioma Mata Atlántica.

En cuanto a la determinación de los valores de referencia de stock de carbono en el suelo, se resalta que el método de adquisición de datos por revisión bibliográfica presentó limitaciones, ya que la obtención de estos valores requiere recolección de muestras y el cálculo de múltiples parámetros de laboratorio, lo que restringe la disponibilidad de datos consistentes. Ante esta limitación, se adoptó un enfoque alternativo para estimar el carbono almacenado en las clases de suelo consideradas en este estudio.

Para cada tipología de suelo encontrada en el Mapeamiento Pedológico-Geotécnico del Municipio de Río de Janeiro (Lumbreras; Gomes, 2004) hubo la necesidad de asociar valores de stock de carbono, como parte de la metodología de detallamiento de los datos de entrada del modelo. Esto se hizo mediante el cálculo de stock de carbono para los perfiles de suelo levantados en el municipio de Río de Janeiro, compilados por Lumbreras y Gomes (2004) y disponibles públicamente en el Banco de Datos de Suelos (BD Suelos) de EMBRAPA SUELOS (2014).

Los perfiles fueron seleccionados siguiendo los criterios de consistencia de los datos y profundidad suficiente para el cálculo, de forma que se utilizaron, en total, 57 perfiles de suelo, además de tres valores de referencia obtenidos en Santos (2015), Stam (2021) y Gomes (2023) para los suelos asociados a manglares y apicums. Sin embargo, la tabla original presentó una desestandarización de las informaciones relacionadas con el Uso de la Tierra, así como diversas lagunas de información en las informaciones referentes a Uso de la Tierra, Actividad de Arcilla y Densidad. Con ello, fue necesario estandarizar y complementar para permitir el posterior cálculo de ECT.

En relación con las lagunas referentes al uso de la tierra en el punto y fecha de recolección de las muestras, se utilizó el método de la fotointerpretación de imágenes Landsat de 1985, accedidas vía Google Earth Pro, complementadas por las descripciones detalladas de los lugares de recolección. La elección de ese año se debió a la proximidad temporal con la recolección original de los perfiles (año de 1974).

Para las lagunas de información referentes a densidad aparente, se utilizó la función de pedotransferencia sugerida por Benites et al. (2007), en su Modelo 4, ilustrado en la ecuación (1):

$$Db = 1.66141 - (0.12455 * N) - (0.00042 * Clay) + (0.10622 * SB) \quad (1) \\ - (0.000059 * Fe_2O_3) - (0.00328 * C:N) + (0.00011 * WDC) \\ + (0.00041 * Al_2O_3) - (0.09597 * (Ca + Mg))$$

Siendo:

Db = Densidad aparente del suelo

N = Nitrógeno

Clay = Arcilla

SB = Suma de cationes básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , e K^+)

Fe_2O_3 = óxido de hierro

C: N = relación Carbono/Nitrógeno

WDC = Arcilla dispersable en agua

Al_2O_3 = óxido de aluminio

$Ca + Mg$ = Calcio sumado al Magnesio

Por último, para las lagunas referentes a actividad de arcilla, se utilizó la fórmula presentada en Ronquim (2010), en la cual la CTC se calcula a partir de la suma de las bases, a pH 7,0 (2):

$$CTC = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+ + H^+ + Al^{3+} \quad (2)$$

Siendo:

CTC = Capacidad de Intercambio Catiónico

Ca^{2+} = iones Calcio

Mg^{2+} = iones Magnesio

K^+ = iones Potasio

Na^+ = iones Sodio

H^+ = iones Hidrógeno

Al^{3+} = iones Aluminio

Para los resultados mayores o iguales a $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, se atribuyó Ta , referente a alta actividad de arcilla, y valores menores de $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ como Tb . El parámetro de $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ se usó para concordar con la metodología utilizada por Bernoux et al. (2002).

A continuación, los suelos fueron distribuidos en los grupos sugeridos por Bernoux et al. (2002), presentados anteriormente en la Tabla 4, los cuales toman en consideración, principalmente, la actividad de arcilla en cada perfil, expresada en Ta (alta) y Tb (baja), que influye directamente en la capacidad de stock de carbono.

Con todas las lagunas completadas, el cálculo del ECT se efectuó para cada horizonte de cada perfil de suelo utilizando los parámetros de tenor de carbono orgánico, densidad aparente y espesor del horizonte (Fidalgo et al., 2007), considerando el espesor máximo estándar de 30 cm de profundidad. La adopción de esta profundidad siguió las directrices metodológicas del IPCC (2006) y refleja, principalmente, limitaciones en la disponibilidad y estandarización de datos edafológicos a escala municipal. Sin embargo, se reconoce que esta elección implica una subestimación sistemática del stock real de carbono en el suelo, sobre todo en ambientes como bosques ombrófilos densos, manglares y áreas húmedas, donde una parte significativa del carbono se encuentra almacenada en profundidades superiores. El ECT se calculó según la ecuación:

$$C_t = \frac{(C \times DS \times E)}{100} \quad (3)$$

Siendo:

C_t = carbono total en el horizonte en kg m^{-2} ,

C = contenido de carbono orgánico en g kg^{-1} ,

DS = densidad del suelo estimada según la ecuación (1) en g cm^{-3} , y

E = espesor del horizonte en cm.

4.3 Integración con las Unidades de Conservación

Por último, los análisis junto a las Unidades de Conservación se realizaron en la última etapa, después de la ejecución del modelo y obtención del mapa final de la estimación de stock de carbono total, a una profundidad de 30 cm. Las UC de las tres esferas fueron agrupadas en una sola capa geoespacial vectorial, que sirvió como máscara para la ejecución de estadística zonal con el fin de obtener el acumulado de carbono almacenado en las UC en su conjunto.

Así, los análisis se realizaron utilizando toneladas por hectárea (tC/ha) como unidad de medida, a fin de normalizar la relación de la densidad de carbono en cada área protegida y eliminar el factor de área total, lo que podría conferir sesgo a los resultados. Primeramente, se calculó el valor de ECT de cada UC (tonC total) mediante la suma de todos los píxeles de stock de carbono dentro de su respectivo territorio. Seguidamente, el valor obtenido fue dividido por el área de cada UC, de forma de obtener el promedio de stock de carbono por hectárea por UC (tonC/ha).

Por último, se extrajeron métricas estadísticas de mínimo, máximo, mediana y desviación estándar para evaluar la distribución del almacenamiento del carbono en las UC insertas en el municipio de Río de Janeiro. Asimismo, los valores de stock de carbono por hectárea por UC fueron agrupados por cortes naturales para posibilitar la elaboración de un histograma de frecuencia y sus acumulados.

5 Resultados y Discusiones

La Figura 3 presenta el mapa final de la estimación de ECT, considerando los cuatro reservorios en toneladas por píxel para la ciudad de Río de Janeiro. Se resalta que cada píxel del ráster final posee aproximadamente 30m x 30m, es decir, cerca de 900 m², lo que permite una mejor visualización para el territorio de Río de Janeiro.

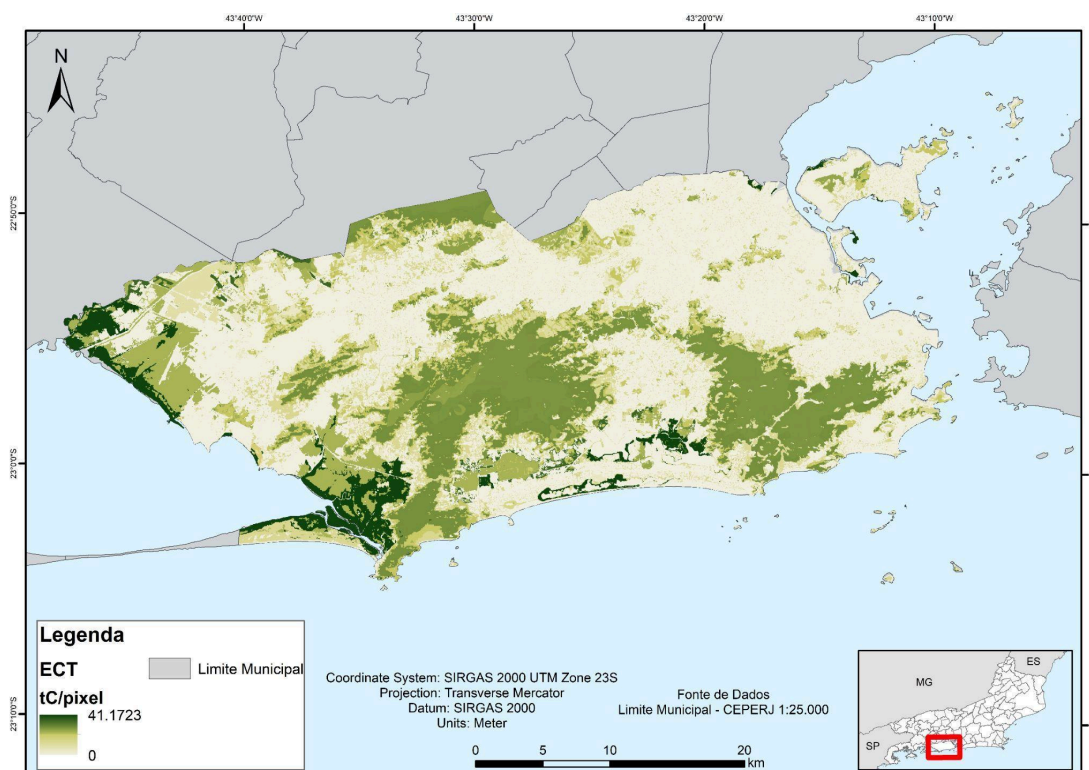


Figura 3: Estimativa de Stock de Carbono Total del municipio de Río de Janeiro.
Fuente: Autores

De forma general, se notó que los mayores valores ocurren en las áreas de baja planicie donde se encuentran coberturas de manglar y áreas húmedas, seguidas por las áreas forestadas en los macizos de la Tijuca, Pedra Blanca y Mendanha. El

resultado obtenido presenta relevante destaque para algunas unidades de paisaje donde predominan coberturas vegetales naturales y suelos con mayor potencial de almacenamiento de carbono.

De esta forma, se constató un valor máximo de ECT de 41,17 tC/píxel en las áreas de cobertura natural de manglar y demás ambientes húmedos asociados a suelos hidromórficos (*wet soils*). Ya las unidades de paisaje formadas por diferentes fitofisionomías de bosque presentaron valor mínimo de ECT de 10,5 t/píxel en las áreas verdes intraurbanas, y máximo de 27,17 tC/píxel en los bosques ombrófilos densos de tierras bajas asociados a los Organosoles.

También se destacaron las áreas de Apicum, cuyo valor medio de stock de carbono correspondió a 18,40 tC/píxel, y Pastizales asociados a los Organosoles, que presentó valor medio de 15,77 tC/píxel. Las demás unidades de paisaje presentaron valores variando entre 3 y 13 tC/píxel, correspondientes a unidades de paisaje con cobertura vegetal degradada y/o suelos de bajo potencial de almacenamiento.

En lo que respecta a la capacidad de almacenamiento en las áreas protegidas presentes en el municipio, la Figura 4 representa espacialmente una estadística zonal de las UC en relación con el ECT, en la unidad de toneladas por hectáreas. Ya la Tabla 6 presenta la lista de los valores encontrados ordenados del mayor al menor, asociados a las respectivas UC.

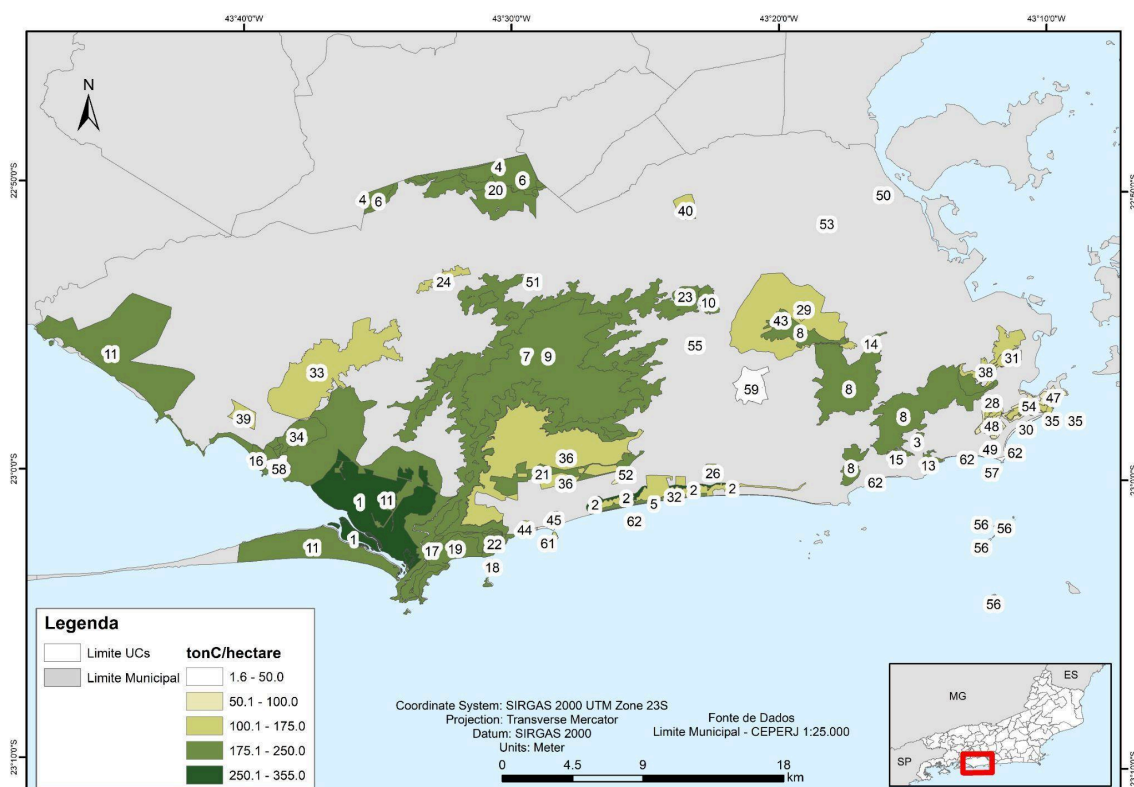


Figura 4: Estadística Zonal del Stock de Carbono por Hectárea en las UC y ranking de las áreas protegidas.
 Fuente: Autores

Tabla 6: Valores de la Estadística Zonal del Stock de Carbono Total en las UC.

| Ranking | Nombre de la UC | Esfera | Área (ha) | TonC (total) | TonC/ha |
|---------|---|-----------|-----------|--------------|---------|
| 1 | REBIO Estadual de Guaratiba | Estadual | 2,815.7 | 999,676.0 | 355.0 |
| 2 | PNM de Marapendi | Municipal | 155.6 | 53,058.9 | 341.0 |
| 3 | PNM da Cidade | Municipal | 46.6 | 11,387.8 | 244.1 |
| 4 | PE do Mendanha | Estadual | 967.1 | 230,813.3 | 238.7 |
| 5 | PNM da Barra da Tijuca Nelson Mandela | Municipal | 162.7 | 38,517.0 | 236.8 |
| 6 | APA de Gericinó-Mendanha | Estadual | 1,490.0 | 349,971.8 | 234.9 |
| 7 | APA da Pedra Branca | Municipal | 5,386.7 | 1,232,838.7 | 228.9 |
| 8 | PN da Tijuca | Federal | 3,958.4 | 903,921.5 | 228.4 |
| 9 | PE da Pedra Branca | Estadual | 12,491.7 | 2,772,495.5 | 221.9 |
| 10 | APA do Morro do Valqueire | Municipal | 166.1 | 36,545.4 | 220.0 |
| 11 | APA da Orla Marítima da Baía de Sepetiba | Municipal | 11,297.8 | 2,384,395.8 | 211.0 |
| 12 | PE da Chacrinha | Estadual | 3.7 | 776.6 | 209.2 |
| 13 | PNM Penhasco Dois Irmãos | Municipal | 36.9 | 7,698.1 | 208.6 |
| 14 | PE do Grajaú | Estadual | 54.7 | 11,234.9 | 205.3 |
| 15 | ARIE de São Conrado | Municipal | 82.3 | 16,752.9 | 203.6 |
| 16 | APA da Brisas | Municipal | 100.4 | 20,380.5 | 202.9 |
| 17 | PNM de Grumari | Municipal | 775,8 | 154.673,6 | 199,4 |
| 18 | PNM da Prainha | Municipal | 141,3 | 28.157,5 | 199,3 |
| 19 | APA de Grumari | Municipal | 928,6 | 182.604,4 | 196,6 |
| 20 | PNM da Serra do Mendanha | Municipal | 1.390,3 | 270.859,6 | 194,8 |
| 21 | REVIS dos Campos de Sernambetiba | Municipal | 557,0 | 108.374,4 | 194,6 |
| 22 | APA da Prainha | Municipal | 150,3 | 28.839,4 | 191,9 |
| 23 | APA do Morro do Cachambi | Municipal | 142,4 | 25.557,6 | 179,5 |
| 24 | ARIE Floresta da Posse | Municipal | 171,6 | 29.940,3 | 174,5 |
| 25 | PNM Fonte da Saudade | Municipal | 2,2 | 359,8 | 161,9 |
| 26 | PNM Bosque da Barra | Municipal | 54,4 | 8.521,0 | 156,6 |
| 27 | PNM da Serra da Capoeira Grande | Municipal | 21,0 | 3.224,8 | 153,6 |
| 28 | APA do Morro da Saudade | Municipal | 59,5 | 8.890,7 | 149,5 |
| 29 | APA do Várzea Country Club | Municipal | 10,3 | 1.523,9 | 148,0 |
| 30 | APA dos Morros da Babilônia e de São João | Municipal | 112,7 | 16.639,4 | 147,7 |
| 31 | APA de São José | Municipal | 108,9 | 15.835,3 | 145,4 |
| 32 | APA do Parque Municipal | Municipal | 938,4 | 135.738,9 | 144,6 |

| Ranking | Nombre de la UC | Esfera | Área (ha) | TonC (total) | TonC/ha |
|---------|--|-----------|-----------|--------------|---------|
| | Ecológico de Marapendi | | | | |
| 33 | APA da Serras de Inhoaíba Cantagalo e Santa Eugênia | Municipal | 2.227,7 | 321.789,5 | 144,4 |
| 34 | APA da Serra da Capoeira Grande | Municipal | 478,9 | 69.032,1 | 144,2 |
| 35 | PNM Paisagem Carioca | Municipal | 138,1 | 19.193,3 | 139,0 |
| 36 | APA do Sertão Carioca | Municipal | 3.247,4 | 426.981,1 | 131,5 |
| 37 | PNM da Freguesia | Municipal | 29,2 | 3.800,7 | 130,1 |
| 38 | APA de Santa Teresa | Municipal | 515,7 | 66.968,0 | 129,9 |
| 39 | APA de Sepetiba li | Estadual | 171,6 | 21.430,7 | 124,9 |
| 40 | REVIS da Floresta do Camboatá | Municipal | 171,6 | 21.260,2 | 123,9 |
| 41 | APA do Morro do Leme | Municipal | 48,7 | 5.815,4 | 119,3 |
| 42 | PNM José Guilherme Merquior | Municipal | 8,3 | 977,1 | 117,9 |
| 43 | APA da Serra dos Pretos Forros | Municipal | 2.715,1 | 295.589,2 | 108,9 |
| 44 | MONA do Recreio dos Bandeirantes | Municipal | 62,7 | 6.645,2 | 105,9 |
| 45 | PNM Chico Mendes | Municipal | 40,6 | 4.271,6 | 105,1 |
| 46 | PNM da Catacumba | Municipal | 97,7 | 10.084,9 | 103,3 |
| 47 | MONA dos Morros do Pão de Açúcar e Urca | Municipal | 86,4 | 8.139,1 | 94,2 |
| 48 | APA do Sacopã | Municipal | 248,5 | 22.925,4 | 92,2 |
| 49 | APA do Morro dos Cabritos | Municipal | 135,5 | 12.369,8 | 91,3 |
| 50 | APA da Fazendinha da Penha | Municipal | 13,2 | 1.195,3 | 90,3 |
| 51 | PNM Fazenda do Viegas | Municipal | 8,5 | 705,4 | 83,1 |
| 52 | APA da Tabebuias | Municipal | 61,7 | 4.672,8 | 75,7 |
| 53 | PNM do Jardim do Carmo | Municipal | 2,5 | 176,4 | 69,2 |
| 54 | APA Paisagem Carioca | Municipal | 160,9 | 10.423,9 | 64,8 |
| 55 | APA da Fazenda da Taquara | Municipal | 8,7 | 548,7 | 63,1 |
| 56 | MONA do Arquipélago da Ilhas Cagarras | Federal | 76,5 | 3.607,9 | 47,2 |
| 57 | APA da Pontas de Copacabana e Arpoador e seus entornos | Municipal | 16,2 | 597,6 | 37,0 |
| 58 | APA do Morro do Silvério | Municipal | 150,1 | 5.386,8 | 35,9 |
| 59 | APA do Bairro da Freguesia | Municipal | 379,5 | 11.543,0 | 30,4 |
| 60 | PNM Darke de Mattos | Municipal | 5,1 | 86,9 | 17,0 |
| 61 | APA da Paisagem e do Areal da Praia do Pontal | Municipal | 16,1 | 88,2 | 5,5 |
| 62 | APA da Orla Marítima | Municipal | 128,0 | 212,0 | 1,65 |

Fuente: Autores

A partir de la estadística zonal se constató que el valor medio de ECT fue de 147,7 tonC/ha, mientras que la mediana correspondió a 145 tonC/ha, lo que indicaría una distribución aproximadamente simétrica. Sin embargo, el desvío estándar encontrado fue de 74,1 tonC/ha, evidenciando una heterogeneidad considerable en los valores de stock de carbono de las UC públicas en el municipio de Río de Janeiro.

El valor máximo encontrado fue de 355 tonC/ha, relativo a la Reserva Biológica Estadual de Guaratiba, incluso poseyendo una menor dimensión territorial en

comparación con las otras. Tal resultado encuentra respaldo en la literatura científica, que demuestra que los manglares brasileños pueden almacenar entre 2,2 y 4,3 veces más carbono en el primer metro de suelo en comparación con otros biomas vegetados del país (Rovai et al., 2021). Resultados complementarios indican que los suelos de manglares presentan los mayores stocks de carbono entre los biomas brasileños, destacándose como ambientes de elevada relevancia para el ciclo del carbono (Camargo, 2022).

De manera semejante, el Parque Natural Municipal de Marapendi, compuesto mayoritariamente por cobertura de manglares, presenta valor estimado en 341 tonC/ha. La sutil caída en el ECT se debe al hecho de que esta UC también está formada por otros tipos de cobertura natural, como restingas, bosques e incluso parte de la laguna de Marapendi, lo que reduce el promedio de toneladas de carbono acumuladas por hectárea.

El Parque Nacional de la Tijuca y el Parque Estatal de la Pedra Blanca, que son las mayores áreas verdes urbanas del municipio, presentaron valor estimado de 228 y 222 tC/ha, respectivamente. Como se ilustró anteriormente, los bosques tienden a almacenar menos carbono que las áreas húmedas y de manglar. Sin embargo, en este caso se considera también el tipo de suelo en la capacidad de almacenar carbono. Ambas UC están compuestas, mayoritariamente, por suelos latossólicos, que ocupan gran parte de las UC y poseen menor capacidad de almacenar carbono (Fidalgo et al., 2007).

En lo que respecta al análisis agrupado por cortes naturales de la distribución de los valores de stock de carbono por hectárea, la Figura 5 muestra el histograma de frecuencia y el porcentaje acumulado por intervalo considerando los datos generados por la estadística zonal.

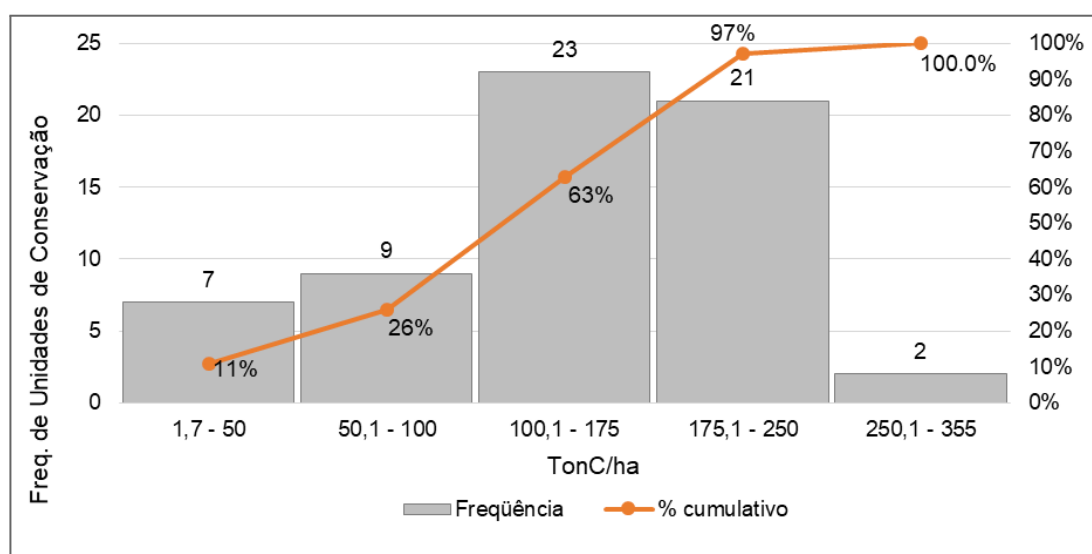


Figura 5: Histograma de frecuencia y frecuencia acumulada de los valores de stock de carbono por hectárea agrupados por cortes naturales.

Fuente: Autores

Fue posible observar que la mayor parte de los datos está en valores intermedios, especialmente entre 100,1 y 250 tonC/ha, con pocas observaciones muy bajas o muy altas. Esta concentración ilustra la mayor cantidad de UC abarcando las fitofisionomías de bosque ombrófilo denso, especialmente las submontanas y montanas, asociadas a suelos de baja actividad de arcilla. Sin embargo, este intervalo también contempla UC que contienen, en alguna proporción, bosques intraurbanos, áreas de pastizal sobre suelos orgánicos, restingas y áreas húmedas.

También fue posible observar una asimetría positiva generada por las dos UC en el intervalo de los valores más altos que pueden estar influenciando la media. Estas

UC abarcan áreas de manglar y suelos hidromórficos (wet soils), cuya capacidad de almacenamiento de carbono quedó por encima de 350 tonC/ha. Tal hecho resalta la necesidad de más acciones del poder público para conservar los remanentes y restaurar áreas de este ecosistema para ampliar la estrategia de adaptación al cambio climático.

4 Conclusión

La propuesta metodológica, así como su aplicación, atendieron a los objetivos de este trabajo. La aplicación del modelo *Carbon Storage and Sequestration* del InVEST 3.14 aliada al refinamiento detallado del mapeo de uso y cobertura del suelo para la creación de las unidades de paisaje Uso-Suelo-Vegetación, permitió representar, en detalle y con mayor precisión, la heterogeneidad del paisaje. Aliado a ello, el refinamiento de la tabla biofísica a partir del cálculo de los perfiles de suelo asociado a valores de referencia nacionales permitió la obtención de un resultado satisfactorio dentro de las limitaciones existentes.

Los resultados evidencian que la combinación entre tipos de vegetación y características edafológicas es determinante para precisar el potencial de almacenamiento de carbono, y que el detallamiento de las bases de datos mejora sustancialmente la precisión de los modelos aplicados. Aun así, limitaciones relacionadas con la escala del mapeo de suelos y con la ausencia de datos específicos en áreas densamente urbanizadas indican la necesidad de avances en levantamientos edafológicos de mayor resolución.

Se constató que los ambientes húmedos y manglares son los mayores responsables por la acumulación de carbono, destacándose la Reserva Biológica Estadual de Guaratiba y el Parque Natural Municipal de Marapendi, cuyos valores elevados evidencian el papel estratégico de la conservación de estos ecosistemas en la mitigación del cambio climático. Los Bosques Ombrófilos, aunque presenten valores menores en comparación con áreas de manglar, también se mostraron extremadamente relevantes, sobre todo en los macizos del municipio, reforzando su papel ecológico y climático.

Sin embargo, la interpretación de los resultados debe considerar ciertas limitaciones metodológicas. Primeramente, la ausencia de una validación de campo directa (in situ) para el presente estudio implica que los resultados son estimativas modeladas basadas en datos secundarios robustos, pero no aferidos localmente para este fin específico. Esto significa que puede haber sobreestimación o subestimación de los resultados.

En segundo lugar, la fijación de la profundidad del suelo en 30 cm subestima el stock total de carbono, especialmente en los suelos indiscriminados de manglar. Según Donato et al. (2011), los manglares contienen en promedio 1.023 tC/ha, en los cuales el compartimento del suelo fue responsable por almacenar de 49-98% del carbono, en profundidad variando de 0,5 a 3 metros. Por lo tanto, los valores aquí presentados deben ser vistos como un escenario base (conservador) para el municipio.

Además, el estudio reafirma la importancia de las unidades de conservación como componentes esenciales de la mitigación climática en grandes centros urbanos, además de proponer una base metodológica robusta de carácter replicable. La expansión de mapeamientos detallados y la continuidad del monitoreo son fundamentales para mejorar estimativas, orientar políticas públicas y fortalecer estrategias integradas de planificación ambiental y climática en el municipio de Río de Janeiro.

Después de la identificación de las principales dificultades y desafíos metodológicos, las etapas subsiguientes del estudio serán direccionadas a su mejoramiento y refinamiento. Inicialmente, se pretende reproducir el análisis con base en los datos de la PCRJ (2018), con el objetivo de refinar la escala de trabajo. Paralelamente, se elaborará un planeamiento estratégico para la realización de

campanhas de campo orientadas a la recolección de puntos muestrales distribuidos por el territorio estadual, así como a la ejecución de mediciones in situ, en conformidad con la metodología propuesta por Arévalo, Alegre y Vilcahuamán (2002).

Por último, se busca incorporar la variabilidad estacional al mapeo de uso y cobertura de la tierra, considerando que determinadas clases, especialmente las áreas húmedas, presentan variaciones expresivas en su extensión a lo largo del año. En este sentido, la elaboración de mapeamientos distintos para diferentes períodos estacionales se configura como estrategia relevante para identificar posibles fluctuaciones en la capacidad de almacenamiento de carbono.

Referencias

AB'SÁBER, Aziz. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

AMARAL, Felipe Gonçalves *et al.* Sistemas verdes urbanos no Rio de Janeiro: novas perspectivas a partir de multissensores e análise em micro escala. **Coleção Estudos Cariocas**, v. 13, n. 4, 2026. DOI:10.71256/19847203.13.4.200.2025.

ANTUNES, Melissa Casacchi; CAMPOS, Tácio Mauro Pereira de; ARARUNA JÚNIOR, José Tavares. Soil carbon storage and retention: a critical synthesis on concepts, research opportunities and sustainable application in environmental engineering. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, [S. l.], 2025. DOI: 10.5327/Z2176-94782704.

AREVALO, Luis Alberto; ALEGRE, Julio Cesar; VILCAHUAMAN, Luciano Javier Montoya. **Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002.

BEILLOUIN, Damien *et al.* A global database of land management, land-use change and climate change effects on soil organic carbon. **Scientific Data**, v. 9, n. 228, 2022. DOI: 10.1038/s41597-022-01318-1.

BENITES, Vinícius de Melo *et al.* Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, v. 139, p. 90–97, 2007. DOI: 10.1016/j.geoderma.2007.01.005.

BERNOUX, Martial *et al.* Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, p. 888–896, 2002.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Relatório de Referência**. Brasília, 2020. 314 p.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Relatório do Inventário Nacional das Emissões Antrópicas por Fontes e das Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa do Brasil: Primeiro Relatório Bienal de Transparência à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (Relatório do Inventário Nacional | 1990-2022)**. Brasília, 2024. 642 p.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima: volume III**. Brasília, 2016. 336 p.

CAMARGO, Suzana. **Solo dos manguezais tem o maior estoque de carbono do Brasil**. *O Eco*, 2022. Disponível em: <https://oeco.org.br/reportagens/solo-dos-manguezais-tem-o-maior-estoque-de-carbo-no-do-brasil/>. Acesso em: 19 nov. 2025.

D'ANDREA, Alexandre Fonseca *et al.* Estoque de carbono orgânico do solo em remanescente de Floresta Alta de Restinga na Mata Atlântica setentrional. In: *Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, 35., 2015, Natal. **Anais... Natal**: SBCS, 2015.

- DON, A. et al. Carbon sequestration in soils and climate change mitigation—definitions and pitfalls. **Global Change Biology**, [S. l.], e16983, 2023. doi: 10.1111/gcb.16983.
- DONATO, Daniel C. et al. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. **Nature Geosci**, [S. l.], v. 4, p. 293–297, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema de Informação de Solos**. Brasília, 2014. Disponível em: https://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/consulta_publica.html. Acesso em: 12 nov. 2025.
- FIDALGO, Elaine Cristina Cardoso et al. **Estoque de carbono nos solos do Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **The state of food and agriculture 2019: moving forward on food loss and waste reduction**. Rome: FAO, 2019.
- FONSÊCA, Nathan C. et al. Carbon stock in aboveground biomass and necromass in the Atlantic Forest. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S. l.], v. 96, n. 1, e20220761, 2024.
- GAMEIRO, Samuel et al. Quantifying terrestrial carbon in the context of climate change. **Carbon Balance and Management**, [S. l.], v. 20, n. 25, 2025. DOI: 10.1186/s13021-025-00316-1.
- GOMES, Arthur Alves Prates. **Acúmulo e estoque de carbono na Manguezal de Atapuz, sistema estuarino de Itapessoca, Goiana (PE)**. 2023. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.
- HE, Y. et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Guilin based on FLUS and InVEST models. **Remote Sensing**, v. 15, n. 5, art. 1445, 2023.
- HOUGHTON, R. A.; HALL, F.; GOETZ, S. J. Importance of biomass in the global carbon cycle. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, G00E03, 2009.
- HOUGHTON, R. A. Land-use change and the carbon cycle. **Global Change Biology**, v. 1, p 275 - 287, 1995.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2012.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Área territorial brasileira**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>.
- INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). **O Estado do Ambiente - Indicadores Ambientais do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2010.
- INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). **Mapeamento da Vegetação no Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: INEA, *no prelo*.
- INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). **Portal GeoINEA – Informações geoespaciais do Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://geoportal.inea.rj.gov.br>. Acesso em: 04 feb. 2026.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2001: Synthesis Report**. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Editores: Watson, R. T. e Core Writing Team. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 398 p.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change and land**. Geneva, 2019.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for national greenhouse gas inventories**. Geneva, 2006.

- LUMBRERAS, J. F.; GOMES, J. B. V. **Mapeamento pedológico e interpretações úteis ao planejamento ambiental do município do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004.
- MELLO, F. F. C. *et al.* Potential of soil carbon sequestration for the Brazilian Atlantic Region. In: LAL, R. *et al.* (ed.). **Carbon sequestration in soils of Latin America**. New York: The Haworth Press, 2006. p. 353–373.
- MENDONÇA-SANTOS, Maria de Lourdes *et al.* **Quantificação e distribuição espacial do carbono orgânico na paisagem e em perfis de solos do Município do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 20 p. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 39).
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA (MMA). **Cadastro Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (CNUC)**. Brasília: MMA, 2026. Disponível em: <https://cnuc.mma.gov.br/>. Acesso em: mar. 2026.
- NATURAL CAPITAL ALLIANCE (NCA). **INVEST 3.14.0**. Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, Stockholm Resilience Centre and the Royal Swedish Academy of Sciences, 2016. Disponível em: <https://naturalcapitalalliance.stanford.edu/software/invest>
- NOGUEIRA JÚNIOR, Laura Rodrigues. Estoque e sequestro de carbono em florestas e sistemas de produção agrícola - Software INVEST. In: **Serviços ecossistêmicos e serviços ambientais de solo, água e carbono em sistemas de produção agrícola e florestal no bioma Amazônia**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. cap. 6, p. 149-157.
- NWAOGU, Chukwudi. *et al.* Three-decades assessment of land use changes and soil carbon stocks. **Environmental Research Communications**, v. 7, art. 055021, 2025.
- PEDREIRA, Luiz Octavio Lima; ANDRADE, Felipe Noronha; FICO, Brasileiro Vito. **Índices de áreas verdes do município do Rio de Janeiro: nota técnica n. 37**. Rio de Janeiro: Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Brasiliano-Fico/publication/344000002_Nota_Tecnica_Indices_de_Areas_Verdes_do_Municipio_do_Rio_de_Janeiro_Nota_Tecnica_-_N_37_Indices_de_Areas_Verdes_do_Municipio_do_Rio_de_Janeiro/links/5f4d8a11458515a88ba0e512/Nota-Tecnica-Indices-de-Areas-Verdes-do-Municipio-do-Rio-de-Janeiro-Nota-Tecnica-N-37-Indices-de-Areas-Verdes-do-Municipio-do-Rio-de-Janeiro.pdf. Acesso em: abr. 2026.
- PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO (PCRJ). **Uso do solo 2018**. Rio de Janeiro: Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, [2018]. Disponível em: <https://www.data.rio/datasets/PCRJ::uso-do-solo-2018/about>.
- PHUKUBYE, K. *et al.* On the impact of grassland management on soil carbon stocks. **Geoderma Regional**, v. 28, 2022.
- RONQUIM, Carlos Cesar. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 26 p. (Embrapa Monitoramento por Satélite. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8)
- ROVAI, Andre S. *et al.* Brazilian mangroves: blue carbon hotspots of national and Global Relevance to Natural Climate Solutions. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 4, 2021.
- SANTOS, Daniel Medina Corrêa. **Estoque de carbono na biomassa subterrânea de florestas de mangue**. 2015. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- SCHIMMEL, David S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. **Global Change Biology**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 77-91, 1995.

SHARMA, Richa *et al.* Spatio-Temporal Assessment of Urban Carbon Storage and Its Dynamics Using InVEST Model. **Land**, v. 13, n. 9, art. 1387, 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/land13091387>.

SILVA, Ane Cristine Fortes da *et al.* Carbon in forest species of the Atlantic Forest as an indicator of stocks and quality. **Floresta**, Curitiba, v. 51, n. 3, p. 630-638, jul./set. 2021

STAM, Gilberto. **Planícies associadas às florestas de mangue retiram carbono da atmosfera**. *Revista Pesquisa FAPESP*, São Paulo, 9 jun. 2021. Disponible en: <https://revistapesquisa.fapesp.br/planicies-associadas-as-florestas-de-mangue-retir-am-carbono-da-atmosfera/>

VEIGA, Larissa Giorgeti. **Variação do estoque de madeira morta em diferentes altitudes de Floresta Ombrófila Densa Atlântica**. 2008. Monografía (Graduação em Ciências Biológicas) – UNESP, Botucatu, 2008.

VILLANOVA, Paulo Henrique *et al.* Necromass Carbon Stock in a Secondary Atlantic Forest Fragment in Brazil. **Forests**, [S. l.], v. 10, n. 10, 833, 2019.

WANG, Ruei-Yuan. *et al.* Comparison of the CASA and InVEST models effects for estimating spatiotemporal differences in carbon storage of green spaces in megacities. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55399-x>

ZAFAR, Zeeshan *et al.* Predictive modeling of regional carbon storage dynamics in response to land use/land cover changes: An InVEST-based analysis. **Ecological Informatics**, [S. l.], v. 82, art. 102701, 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102701>.

ZANATTA, Josiléia Acordi *et al.* **Índice de alteração do carbono no solo**. Colombo: Embrapa Florestas, 2020

Sobre los Autores

Beatriz Ambrosio Garcia de Oliveira es bachiller en Ciencias Matemáticas y de la Tierra por la Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ), y fue analista ambiental en el Instituto Estadual del Ambiente, donde desarrolló esta investigación. Actualmente, es maestranda en Geología, y graduanda en Geografía, ambos por la misma institución.

Victor Buznello de Vasconcellos Maluf es máster, licenciado, y bachiller en Geografía por la Universidad Federal Fluminense (UFF), y Especialista en Gestión Ambiental por la Escuela Politécnica de la UFRJ. Actualmente integra el cuerpo técnico del Instituto Estadual del Ambiente de Río de Janeiro, actuando como Jefe del Servicio de Gestión Ecosistémica.

Paulo Vinicius Rufino Fevrier es geógrafo por la Universidad Estadual de Río de Janeiro (UERJ), máster en Geografía y especialista en Geología del Cuaternario, ambos por la UFRJ. Actualmente, ocupa el cargo de Gerente en la Gerencia de Gestión del Territorio e Informaciones Geoespaciales del INEA.

Contribuciones de los Autores

Conceptualización, [B.A.G.O, V.B.V.M]; metodología, [B.A.G.O, V.B.V.M, P.V.R.F]; software, [B.A.G.O]; validación, [B.A.G.O, V.B.V.M]; análisis formal, [B.A.G.O, V.B.V.M]; investigación, [B.A.G.O, V.B.V.M]; curación de datos, [B.A.G.O, V.B.V.M, P.V.R.F]; redacción - preparación del borrador original, [B.A.G.O]; redacción - revisión y edición, [B.A.G.O, V.B.V.M]; supervisión, [V.B.V.M, P.V.R.F]. Todos los autores leyeron y concuerdan con la versión publicada del manuscrito.

Conflictos de Interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Agradecimientos

Los autores reconocen las contribuciones del Instituto Estadual del Ambiente por el incentivo al uso del software InVEST mediante la realización de un curso de capacitación.

Sobre la *Coleção Estudos Cariocas*

La *Coleção Estudos Cariocas* (ISSN 1984-7203) es una publicación dedicada a estudios e investigaciones sobre el Municipio de Río de Janeiro, vinculada al Instituto Pereira Passos (IPP) de la Secretaría Municipal de la Casa Civil de la Alcaldía de Río de Janeiro.

Su objetivo es divulgar la producción técnico-científica sobre temas relacionados con la ciudad de Río de Janeiro, incluyendo sus conexiones metropolitanas y su inserción en contextos regionales, nacionales e internacionales. La publicación está abierta a todos los investigadores (sean empleados municipales o no), abarcando áreas diversas — siempre que aborden, parcial o totalmente, el enfoque espacial de la ciudad de Río de Janeiro.

Los artículos también deben alinearse con los objetivos del Instituto, a saber:

1. promover y coordinar la intervención pública en el espacio urbano del Municipio;
2. proveer e integrar las actividades del sistema de información geográfica, cartográfica, monográfica y de datos estadísticos de la Ciudad;
3. apoyar el establecimiento de las directrices básicas para el desarrollo socioeconómico del Municipio.

Se dará especial énfasis a la articulación de los artículos con la propuesta de desarrollo económico de la ciudad. De este modo, se espera que los artículos multidisciplinares enviados a la revista respondan a las necesidades de desarrollo urbano de Río de Janeiro.