



# Los humedales del municipio de Río de Janeiro: caracterización y régimen de inundación de los paisajes pantanosos cariocas

*Wetlands of the Municipality of Rio de Janeiro: characterization and flooding regime of Carioca marsh landscapes*

*Os wetlands do município do Rio de Janeiro: caracterização e regime de inundação das paisagens pantanosas cariocas*

Evelyn de Castro Porto Costa<sup>1</sup> y Raúl Sánchez Vicens<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rua Arízio Gomes da Costa, s/n - Jardim Flamboyant, Cabo Frio - RJ, ORCID 0000-0001-7648-6949, evelyncastroporto@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal Fluminense (UFF), Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/nº. BLOCO O, Campus da Praia Vermelha Boa Viagem – Niterói/RJ, ORCID 0000-0002-4429-806X, rsvincens@id.uff.br

## Resumen

Esta investigación aborda la identificación y clasificación multitemporal de humedales en el municipio de Río de Janeiro, utilizando imágenes de los satélites Sentinel-1 (SAR) y Sentinel-2 (óptico) integradas mediante el algoritmo de aprendizaje automático Random Forest. Los resultados indican que aproximadamente el 13% del territorio de Río de Janeiro está compuesto por áreas inundadas de forma permanente o estacional, ubicadas principalmente en llanuras costeras y bahías. La investigación destaca la relevancia ecológica de los humedales en la regulación hídrica, la biodiversidad y la mitigación del cambio climático, enfatizando la necesidad de delimitar estas áreas para la planificación y gestión urbana.

Palabras clave: humedales, random forest, régimen de inundaciones

## Abstract

This research addresses the multitemporal identification and classification of wetlands in the municipality of Rio de Janeiro, using images from Sentinel-1 (SAR) and Sentinel-2 (optical) satellites integrated through the Random Forest machine learning algorithm. The results indicate that approximately 13% of Rio de Janeiro's territory is composed of permanently or seasonally flooded areas, predominantly located in coastal plains and bays. The research highlights the ecological relevance of wetlands in water regulation, biodiversity, and climate change mitigation, emphasizing the need to delineate these areas for city planning and management purposes.

Keywords: wetlands, random forest, flood regime

## Resumo

A pesquisa aborda a identificação e classificação multitemporal dos wetlands do município do Rio de Janeiro, utilizando imagens dos satélites Sentinel-1 (SAR) e Sentinel-2 (óptico) integradas por meio do algoritmo de aprendizado de máquina Random Forest. Os resultados indicam que cerca de 13% do território carioca é composto por áreas inundadas de forma permanente ou sazonal, predominantemente localizada nas áreas planícies costeiras e baías. A pesquisa evidencia a relevância ecológica dos wetlands na regulação hídrica, na biodiversidade e na mitigação das mudanças climáticas, ressaltando a necessidade de delimitação desses objetos para fins de planejamento e gestão da cidade.

Palavras-chave: áreas úmidas, random forest, regime de inundação

## 1 Introducción

Los humedales pueden comprenderse, de forma más amplia, como áreas cubiertas por aguas someras (Russi *et al.*, 2013). Moore (2008) señala que los humedales ocupan el 6% de la superficie mundial, estando distribuidos generalmente en pequeñas manchas a lo largo de un área muy extensa, lo que contribuye a su elevada fragmentación, aumentando su vulnerabilidad.

El principal hito mundial para la preservación de los humedales ocurrió a través de la Convención de Ramsar, en febrero de 1971, en la ciudad de Ramsar, Irán. Esta fue reconocida como un tratado intergubernamental que entró en vigor en 1975, fomentando la cooperación entre los países para la conservación y el uso racional de los humedales.

En Brasil, los humedales también son conocidos popularmente como áreas húmedas o pantanos. En la legislación brasileña, el concepto de áreas húmedas puede encontrarse en el Código Forestal Brasileño, aprobado por la Ley nº 12.651, del 25 de mayo de 2012. En la Ley, los humedales son entendidos como áreas húmedas, definiéndolos como “pantanos y superficies terrestres cubiertas periódicamente por agua, originalmente cubiertas por bosques u otras formas de vegetación adaptadas a la inundación” (Brasil, 2012), lo que corrobora la conceptualización internacional de estos ambientes.

En 1993, Brasil firmó el tratado de la Convención de Ramsar, formalizando su adhesión mediante el Decreto nº 1.905, del 16 de mayo de 1996, por el cual Brasil promulgó en su marco legal las directrices de la Convención.

En Brasil, el Decreto nº 10.141, del 28 de noviembre de 2019, instituyó el Comité Nacional de Zonas Húmedas en Brasil. Este comité, de carácter permanente, tiene entre sus objetivos: proponer acciones, contribuir al uso sostenible de las áreas húmedas, sugerir y evaluar nuevos sitios de importancia internacional, apoyar y difundir la Convención de Ramsar en Brasil, entre otros.

Junk *et al.* (2014) señalan que los humedales están presentes en cerca del 20% del territorio brasileño. Los autores también destacan que, en el país, las áreas húmedas costeras han sido suprimidas o impactadas directamente por la expansión urbana y en respuesta a la demanda de viviendas frente al mar o en áreas escénicas.

El hecho de que la mayor parte de las áreas húmedas brasileñas se sequen periódicamente diferencia a Brasil de los países de clima frío y templado, que presentan un alto porcentaje de humedales permanentemente húmedos, con niveles de agua estables o suelos permanentemente encharcados, como diferentes tipos de turberas (Junk *et al.*, 2014). Por ello, existe la necesidad de una clasificación adaptada a las características nacionales, basada en las particularidades regionales.

Según los estudios brasileños elaborados por Junk *et al.* (2014) y Cunha *et al.* (2014), que consideran las especificidades y características físicas del país, los humedales en Brasil se consideran de acuerdo con la siguiente definición:

Las Áreas Húmedas son ecosistemas en la interfaz entre ambientes terrestres y acuáticos, continentales o costeros, naturales o artificiales, permanentemente o periódicamente inundados o con suelos encharcados. Las aguas pueden ser dulces, salobres o saladas, con comunidades de plantas y animales adaptadas a su dinámica hídrica. (Junk *et al.*, 2014, p. 12)

Entre las numerosas potencialidades de los humedales, destaca su importancia en el ciclo del agua. Los ciclos globales y locales del agua dependen fuertemente de las áreas húmedas, siendo los humedales una parte fundamental de los ciclos hidrológicos, debido a su influencia sobre los nutrientes y el carbono presentes en estas áreas (Russi *et al.*, 2013), además de contribuir de manera significativa a la mitigación del cambio climático.

Moore (2008) destaca que existen diferentes tipos de humedales, lo que dificulta la definición de un único concepto; sin embargo, la presencia del agua constituye el elemento común a todos ellos. Estas zonas pueden considerarse áreas con condiciones de humectación por inundación permanente o temporal, de agua dulce o salada.

Para apoyar los estudios de sistemas terrestres, actualmente se dispone de una gran diversidad de datos, también denominados por autores del área de la geoinformación como Big (EO) Data, que corresponden a grandes volúmenes de datos de observación de la Tierra. Estos datos se caracterizan por su gran volumen, variedad y velocidad, además de su elevado valor y veracidad, según lo señalado por Longley *et al.* (2013).

En este escenario, la clasificación y el mapeo de humedales a partir de datos de teledetección constituyen un desafío metodológico relevante, ya que estos ambientes presentan una fuerte variabilidad temporal en las respuestas espectrales a lo largo del año. Los cambios entre períodos secos y húmedos, asociados a interferencias atmosféricas, dificultan la detección precisa de estas áreas.

La clasificación temática en estudios de uso y cobertura del suelo debe ser debatida continuamente, ya que las leyendas adoptadas en los mapeos oficiales no siempre contemplan la complejidad de ecosistemas como los humedales. Esta limitación refuerza la necesidad de metodologías capaces de representar adecuadamente su dinámica espacio-temporal.

Una posibilidad metodológica orientada a apoyar este desafío son las imágenes de radar provenientes del Radar de Apertura Sintética (SAR) del satélite Sentinel-1, asociadas a imágenes Sentinel-2 (sensor óptico). Una característica distintiva del método de imagen por radar es la adquisición de datos casi independiente de las condiciones atmosféricas, lo que permite su aplicación en áreas con cobertura nubosa constante o incluso la obtención de información de la superficie terrestre durante períodos de intensa precipitación, sin influencia de las nubes (Paradella *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2021). Esta característica favorece la construcción de series temporales continuas, esenciales para el monitoreo de las dinámicas de inundación.

En este contexto, este artículo tiene como objetivo proponer y evaluar un enfoque multitemporal para la clasificación de los humedales en el municipio de Río de Janeiro, utilizando datos de teledetección óptica y radar. Se parte del supuesto de que el comportamiento dinámico de los humedales debe comprenderse como una propiedad inherente a la especificidad de este objeto, considerando su ocurrencia en el espacio y en el tiempo.

De este modo, la pertinencia de esta investigación se relaciona con estudios multitemporales en el ámbito de las técnicas de Teledetección, además de permitir comprender los componentes espaciales, temporales y descriptivos de los humedales cariocas, con el fin de contribuir a su inclusión como clase temática en los estudios ambientales. Los resultados obtenidos podrán subsidiar la ordenación territorial y apoyar estrategias de conservación de estos ambientes, especialmente en el contexto del cambio climático.

### **1.1 Los humedales del municipio de Río de Janeiro**

Las áreas húmedas pueden actuar como esponjas gigantes, absorbiendo el exceso de agua y liberándola lentamente hacia los ríos, de donde puede extraerse para su uso en la irrigación agrícola, procesos industriales o consumo doméstico (Moore, 2008).

Por tratarse de un ambiente sensible, es importante destacar los problemas de ocupar, intervenir o modificar las áreas húmedas sin la debida planificación y el conocimiento de su dinámica. Los procesos de ocupación de estas áreas pueden impactar directamente en los cambios del sistema hidrogeológico, ya que muchas de ellas son zonas de exudación o recarga de acuíferos.

Además, el proceso de impermeabilización del suelo dificulta el drenaje natural del agua, intensificando la ocurrencia de inundaciones y anegamientos. Más allá de las pérdidas económicas, es importante mencionar el riesgo de contagio de enfermedades e incluso la pérdida de vidas humanas que estos eventos pueden causar a los habitantes de estas localidades (Seabra y Rocha-Leão, 2019).

Según Junk *et al.* (2014), el aumento de la densidad poblacional y la acelerada transformación de las formas de uso del suelo, especialmente en los ambientes acuáticos, constituyen los principales mecanismos de degradación y pérdida de las áreas húmedas brasileñas, tales como: (1) drenaje para la agricultura y la ganadería; (2) construcción de áreas residenciales, infraestructura urbana y uso industrial; (3) contaminación por aguas residuales y desechos domésticos, industriales y mineros; (4) construcción de centrales hidroeléctricas, que inundan áreas húmedas aguas arriba de las represas, interrumpen la conectividad longitudinal y modifican el pulso de inundación aguas abajo; (5) construcción de hidrovías; (6) construcción de diques que interfieren en la conectividad lateral, separando las áreas húmedas de los ríos; (7) explotación indebida de los recursos naturales (recursos pesqueros, madereros y no madereros, y de la biodiversidad); (8) cambios en el clima global.

Junk *et al.* (2014) señalan que entre las áreas húmedas más amenazadas de Brasil se encuentran los humedales existentes en la Mata Atlántica, sobre los cuales hay poca información. Estos ejemplos pueden encontrarse en el municipio de Río de Janeiro, siendo bastante frecuentes en los paisajes de llanuras costeras y fluviales.

Cabe destacar que la presencia de humedales en Río de Janeiro se restringe específicamente a áreas con relieve más aplanado, es decir, llanuras fluviomarinas, deltaicas, aluviales, eólico-marinas, fondos de valle y depresiones. La existencia de humedales en el área de estudio se limita a estos recortes espaciales, ya que es donde se puede mantener la concentración de inundación debido a su baja pendiente. Además, en las áreas de bahía es frecuente la identificación de estuarios y vegetación adaptada a la inundación, así como fauna y flora específicas.

Muchas localidades con humedales en el Estado de Río de Janeiro han sufrido grandes modificaciones en las últimas décadas, principalmente en lo que respecta a la rectificación de canales con fines de crecimiento urbano. En el municipio de Río de Janeiro, se destacan los alrededores de la bahía de Guanabara y los sistemas lagunares de Jacarepaguá (Figura 1) y Rodrigo de Freitas, entre otras regiones de las zonas norte y oeste.



Figura 1: Ejemplos de humedal localizado en Barra da Tijuca.

Fuente: Custódio Coimbra/O Globo (2012)

## 2 Materiales y Métodos

### 2.1 Área de Estudios

Según los datos del censo de 2022 (IBGE, 2022), el municipio de Río de Janeiro cuenta con una población de 6.211.223 habitantes y una densidad demográfica de 5.174,6 habitantes por km<sup>2</sup>, siendo el municipio con mayor población del estado y el segundo del país.

Dada esta alta complejidad, es necesario un planeamiento adecuado y acorde con las demandas de la ciudad. En este sentido, la Ley Complementaria nº 111, de 1º de febrero de 2011 (PCRJ, 2011), establece la Política Urbana y Ambiental del Municipio e instituye el Plan Director de Desarrollo Urbano Sostenible del Municipio de Río de Janeiro, definiendo las unidades territoriales que apoyan la planificación y el control del desarrollo urbano municipal:

I – Áreas de Planificación (AP), establecidas mediante la división del territorio municipal a partir de criterios de compartimentación ambiental, características históricamente-geográficas y de uso y ocupación del suelo; II – Regiones de Planificación, establecidas por el agrupamiento de Regiones Administrativas y por la subdivisión de las Áreas de Planificación según criterios específicos de homogeneidad, con el objetivo de apoyar la organización de la información y la integración de la acción descentralizada de los órganos municipales en la implementación de políticas públicas sectoriales (PCRJ, 2011, p. 17)

Las Áreas de Planificación (AP) son de gran importancia para los estudios de análisis ambiental, ya que su compartimentación ambiental permite considerar los diferentes tipos de humedales presentes en el paisaje carioca. Junto con ellas, las Regiones de Planificación también contribuyen a subdividir el territorio municipal en porciones más pequeñas (Figura 2).

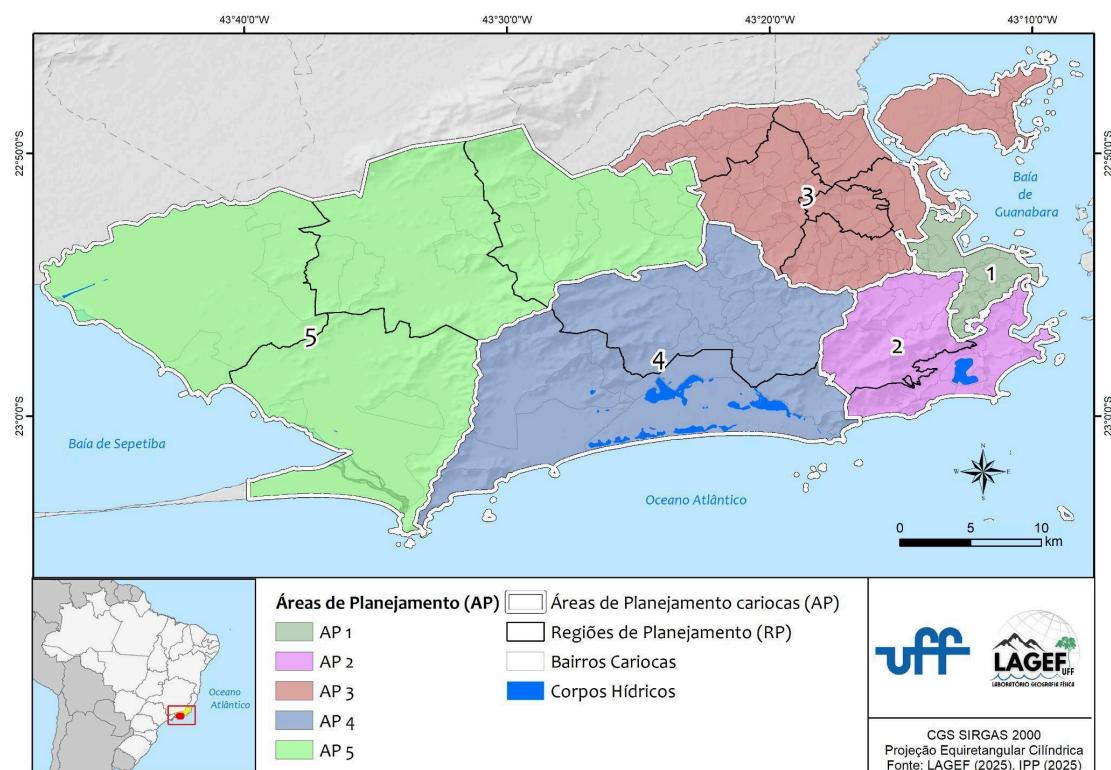


Figura 2: Localización de las áreas administrativas del municipio de Río de Janeiro.  
Fuente: los autores (2025).

El municipio se divide en cinco Áreas de Planificación (AP): la AP-1, correspondiente al Centro; la AP-2, que abarca la Zona Sur y Tijuca; la AP-3, compuesta por Ramos, Méier, Madureira, Inhaúma, Penha, Pavuna e Ilha do

Gobernador; la AP-4, que incluye Jacarepaguá y Barra da Tijuca; y la AP-5, formada por Bangu, Campo Grande, Santa Cruz y Guaratiba (Tabla 1).

Tabla 1: Descripción de las Áreas de Planificación (AP) y Regiones de Planificación (RP) del municipio de Río de Janeiro.

| AP | RP  | Región de Planificación | Área (km <sup>2</sup> ) |
|----|-----|-------------------------|-------------------------|
| 1  | 1.1 | Centro                  | 34,40                   |
| 2  | 2.1 | Zona Sul                | 45,27                   |
|    | 2.2 | Tijuca                  | 55,17                   |
| 3  | 3.1 | Ramos                   | 15,57                   |
|    | 3.2 | Méier                   | 30,35                   |
|    | 3.3 | Madureira               | 46,08                   |
|    | 3.4 | Inhaúma                 | 13,84                   |
|    | 3.5 | Penha                   | 24,52                   |
|    | 3.6 | Pavuna                  | 31,67                   |
|    | 3.7 | Ilha do Governador      | 41,45                   |
| 4  | 4.1 | Jacarepaguá             | 120,23                  |
|    | 4.2 | Barra da Tijuca         | 173,56                  |
| 5  | 5.1 | Bangu                   | 116,63                  |
|    | 5.3 | Santa Cruz              | 164,08                  |
|    | 5.4 | Guaratiba               | 152,58                  |
|    | 5.2 | Campo Grande            | 138,76                  |

Fuente: Instituto Pereira Passos (2025).

La Ley Complementaria nº 111, de 1º de febrero de 2011 (PCRJ, 2011), también refuerza la importancia de la conservación de los ambientes húmedos en la planificación territorial y ambiental del municipio. El Art. 172 destaca la necesidad de proteger los recursos hídricos, y su inciso V señala como necesidad “proteger las áreas colindantes a los cursos de agua en las intervenciones municipales de uso del suelo, con el fin de resguardar las zonas inundables y preservar los bosques húmedos de las llanuras inundables” (PCRJ, 2011, p 66).

El Art. 178 (PCRJ, 2011) orienta la promoción de reforestaciones ecológicas destinadas a la restauración de la Mata Atlántica y de los ecosistemas asociados, incluidos los ambientes húmedos y pantanosos. El inciso I de este artículo destaca “promover la implantación y el mantenimiento de reforestaciones ecológicas con el objetivo de restaurar la Mata Atlántica y los ecosistemas asociados, así como los ambientes húmedos y pantanosos” (PCRJ, 2011, p. 69).

Estas directrices evidencian el papel estratégico de los humedales para el municipio, ya que estos ambientes actúan en la regulación del régimen hídrico, la recarga de acuíferos, la retención de sedimentos y el mantenimiento de la biodiversidad, garantizando la sostenibilidad ambiental y la seguridad hídrica de la ciudad, especialmente frente a los desafíos impuestos por la urbanización y el cambio climático.

## 2.2 Teledetección multiesensor y aprendizaje automático

El mapeo y la clasificación de humedales mediante teledetección han sido ampliamente discutidos en la literatura, especialmente en ambientes tropicales y costeros, donde la elevada variabilidad espacio-temporal y la frecuente cobertura nubosa imponen importantes desafíos metodológicos. En este contexto, se ha destacado la integración de sensores con diferentes características como una estrategia para representar la dinámica hidrológica y ecológica de estos ambientes.

Los datos de Radar de Apertura Sintética (SAR) de la misión Sentinel-1 presentan una reconocida aptitud para el monitoreo de humedales, ya que el retroespalhamento radar es sensible a la presencia de agua libre, a la humedad del suelo y a la estructura de la vegetación. En regiones costeras brasileñas y áreas de la Mata Atlántica, caracterizadas por regímenes estacionales de inundación y alta nubosidad, el uso de imágenes SAR ha demostrado ser fundamental para la detección de áreas periódicamente inundadas y el seguimiento de eventos hidrológicos extremos (Paradella *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2021; Slagter *et al.*, 2020).

La resolución espacial de la constelación Sentinel-1, de 10 metros, permite la construcción de series temporales densas, un aspecto relevante en humedales tropicales, en los que la alternancia entre períodos secos y húmedos ocurre de manera rápida e irregular. Estudios aplicados al territorio brasileño indican que esta característica favorece la identificación de patrones dinámicos de inundación, difíciles de ser captados únicamente por sensores ópticos (Junk *et al.*, 2014; Mahdianpari *et al.*, 2018).

Por su parte, las imágenes ópticas del Sentinel-2 desempeñan un papel complementario esencial, especialmente en la discriminación espectral de la vegetación asociada a los humedales y en la diferenciación entre tipos de cobertura del suelo. Trabajos realizados en áreas costeras y en biomas tropicales demuestran que las bandas del visible, del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta son eficaces para identificar variaciones fenológicas, gradientes de humedad y respuestas de la vegetación a los regímenes de inundación (Jamali *et al.*, 2021; Slagter *et al.*, 2020).

Jamali *et al.* (2021) señalan que, a pesar de los excelentes resultados obtenidos a partir de datos ópticos, una metodología sinérgica desarrollada a partir de la integración de datos SAR del Sentinel-1 y datos ópticos del Sentinel-2 fue más eficiente para el mapeo de humedales en Canadá (Mahdianpari *et al.*, 2019) y Sudáfrica (Slagter *et al.*, 2019). De este modo, la integración entre Sentinel-1 y Sentinel-2 ha sido señalada como un enfoque híbrido robusto para el mapeo de humedales, al combinar la estabilidad de los datos SAR frente a las condiciones atmosféricas con el detalle espectral de los sensores ópticos.

Asociado a este enfoque multiesensor, el uso de algoritmos de aprendizaje automático ha ampliado significativamente el potencial analítico de las series temporales de imágenes orbitales. Entre estos algoritmos, el Random Forest se destaca en la literatura por su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos, integrar múltiples variables y reducir problemas de sobreajuste, presentando un alto desempeño en estudios de clasificación de uso y cobertura del suelo (Breiman, 2001; Belgiu; Drăguț, 2016).

El análisis de series temporales de imágenes y los métodos de aprendizaje automático han sido ampliamente utilizados para la clasificación de uso y cobertura del suelo y la detección de cambios con buenos resultados (Maus *et al.*, 2016). En aplicaciones orientadas al mapeo de humedales, el Random Forest ha sido empleado en contextos tropicales, costeros y de elevada heterogeneidad ambiental, incluyendo áreas de la Mata Atlántica y humedales brasileños. Los estudios indican que el algoritmo es particularmente eficiente para capturar patrones no lineales asociados a la dinámica hidrológica, además de permitir la evaluación de la importancia relativa de las variables espectrales, temporales y de retroespalhamento radar utilizadas en el proceso de clasificación (Cutler *et al.*,

2012; Mahdianpari *et al.*, 2018; Jamali *et al.*, 2021).

De este modo, la integración entre datos SAR del Sentinel-1, imágenes ópticas del Sentinel-2 y el algoritmo de clasificación Random Forest se inserta en una tendencia de la literatura internacional y nacional, especialmente en estudios orientados al mapeo y la caracterización de humedales en ambientes tropicales y costeros. Este enfoque ha demostrado ser particularmente adecuado para representar la naturaleza dinámica de estos ecosistemas, contribuyendo a su mejor inclusión como clase temática en estudios ambientales y de ordenamiento territorial.

### **2.3 Clasificación de imágenes ópticas y SAR utilizando Random Forest**

La ejecución de las etapas de preprocessamiento y clasificación de imágenes orbitales se realizó a partir de escenas obtenidas y procesadas mediante la plataforma digital Google Earth Engine (GEE)<sup>1</sup>. El GEE es una plataforma de procesamiento geoespacial basada en la nube para el monitoreo y análisis ambiental a gran escala, que proporciona acceso a petabytes de imágenes de teledetección, permite el procesamiento paralelo de algoritmos de aprendizaje automático y cuenta con una biblioteca de Interfaces de Programación de Aplicaciones (API) con entornos de desarrollo que admiten lenguajes de programación populares como JavaScript y Python (Tamiminia, 2020).

Carvalho Júnior (2018) destaca el amplio uso de imágenes de teledetección, tanto ópticas como de radar, en la detección de la superficie de agua. El autor también discute el potencial del procesamiento en la nube, el uso de imágenes con alta resolución temporal y el desarrollo de nuevos algoritmos para la clasificación de áreas inundables. Existe una gran cantidad de trabajos en Brasil que utilizan imágenes SAR para la clasificación de áreas inundables, también denominadas áreas húmedas o humedales, principalmente en biomas como la Amazonía y el Pantanal, como se observa en Magalhães (2022), Cardoso (2023), Silva (2020) y Teixeira (2011).

Investigaciones en otros continentes también refuerzan el uso de imágenes SAR en la clasificación de humedales. No obstante, Jamali *et al.* (2021) señalan que, a pesar de los excelentes resultados obtenidos a partir de datos ópticos, una metodología sinérgica basada en la integración de datos SAR del Sentinel-1 y datos ópticos del Sentinel-2 fue más eficiente para el mapeo de áreas húmedas en Canadá (Mahdianpari *et al.*, 2019) y Sudáfrica (Slagter *et al.*, 2019).

De este modo, como metodología para la clasificación de humedales, se adoptó el algoritmo de aprendizaje automático Random Forest, asociado a las series temporales del Sentinel-1 (sensor SAR) y Sentinel-2 (sensor MSI). Cabe destacar que se realizó una clasificación multitemporal, considerando períodos secos y húmedos, con el fin de otorgar mayor precisión a la clase temática a ser mapeada.

Para esta investigación se adoptó el período de 2019 a 2021, con el objetivo de mapear diferencias interanuales, considerando años de mayor y menor pluviosidad, sin interrupciones estacionales. De esta manera, se consideró el pulso de inundación interestacional, con el propósito de evitar pérdidas en la comprensión de esta dinámica. Estos datos pueden contribuir a identificar los pulsos de inundación de los humedales, de acuerdo con la humedad y su persistencia en diferentes épocas del año, y apoyar la selección de las series temporales a ser clasificadas.

En el GEE se desarrollaron dos scripts separados: el primero para la clasificación de imágenes SAR y el segundo para la clasificación de imágenes ópticas. En el primer script se utilizó la colección de imágenes Sentinel-1 (correspondiente a las misiones Sentinel-1A y Sentinel-1B) del tipo GRD (Ground Range Detected), considerando las siguientes características para el filtrado de la colección: modo

<sup>1</sup> Los scripts utilizados en Google Earth Engine (GEE) fueron elaborados antes del cambio en las políticas de acceso a la plataforma, el cual entró en vigor el 13 de noviembre de 2024. A partir de esa fecha, la creación de un proyecto vinculado a Google Cloud Platform pasó a ser obligatoria para todos los usuarios, incluidos aquellos con proyectos de naturaleza no comercial, para acceder a GEE.

Interferometric Wide Swath (IW); órbita descendente; resolución espacial de 10 metros; y selección de las polarizaciones VH y VV. Además del filtrado por localización y fecha de inicio y fin, se aplicó un filtrado espacial para la reducción del ruido speckle mediante un filtro Lee con ventana 3x3 (Lee, 1980).

En el segundo script se utilizaron series temporales del Sentinel-2, cuyo principal desafío es la interferencia atmosférica, especialmente la presencia de nubes, frecuente en regiones tropicales e intensificada en los meses más lluviosos del verano. Para superar este problema, se adoptaron dos estrategias: i) filtrado de imágenes con hasta un 40% de cobertura nubosa y ii) aplicación de una máscara para eliminar las áreas afectadas. Otro factor que dificultó la clasificación fue la presencia de áreas escarpadas, como colinas y montañas, además de sombras, que fueron erróneamente identificadas como humedales debido a la alta absorción espectral. Para corregir estas inconsistencias, se incorporó una máscara de pendiente obtenida a partir del modelo digital de elevación de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) versión 3.0 (SRTM Plus), evitando que terrenos escarpados fueran incluidos en el mapeo. Además, se incorporó al script el cálculo de métricas orientadas a la obtención de la mediana de las bandas Azul (B02), Verde (B03), Roja (B04) e Infrarrojo Cercano (B08), así como del índice NDWI, para la generación de composiciones mensuales.

Ambos scripts, correspondientes a las series temporales del Sentinel-1 y Sentinel-2, fueron sometidos a los mismos procedimientos de procesamiento, con el objetivo de crear mejores condiciones para la construcción de composiciones mensuales que representaran el promedio de los píxeles libres de nubes de cada mes. El uso de composiciones, ampliamente empleado en el análisis de series temporales, permite sintetizar la información de múltiples imágenes en una sola, optimizando el análisis en áreas extensas (Griffiths *et al.*, 2019).

Para la etapa de muestreo, se utilizaron muestras binarias (0 = no humedales y 1 = humedales), abarcando la diversidad de tipos existentes en el área de estudio. La clasificación se realizó en Google Earth Engine mediante el algoritmo Random Forest (RF), configurado con 500 árboles de decisión y un número ilimitado de nodos, utilizando 4.901 muestras representativas de clases invariantes entre 2019 y 2021.

Después de realizar por separado las clasificaciones de las imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2, fue necesario llevar a cabo una serie de procesos estadísticos con los datos generados, con el fin de unificar los productos obtenidos y realizar análisis espaciales y estadísticos de las clasificaciones. En este sentido, se utilizó el lenguaje R para promover la intersección entre las clasificaciones mensuales realizadas por los sensores. Finalmente, se llevó a cabo una segmentación temporal de las clasificaciones, con el fin de obtener resultados sobre la trayectoria secuencial de los humedales. Esta segmentación fue de suma importancia para identificar de manera continua el régimen de inundación de los humedales y comprender los patrones estacionales de dichos regímenes.

Para la validación del mapeo, se adoptó una metodología de muestreo aleatorio y estratificado en la plataforma GEE, denominada AREA2. Este diseño muestral ofrece la opción de controlar el tamaño de la muestra en clases que ocupan una pequeña proporción del área, con el fin de reducir los errores estándar de las estimaciones de precisión específicas por clase (Olofsson *et al.*, 2014). Por lo tanto, el diseño muestral aleatorio estratificado adoptado consideró la cantidad de muestras de acuerdo con su extensión territorial en el área de estudio.

### 3 Resultados e discussões

#### 3.1 Resultados y discusiones

Las clasificaciones obtenidas a partir de los sensores radar y ópticos fueron unificadas y validadas de manera conjunta. A partir de los resultados obtenidos

mediante la validación del mapeo (Tabla 2), es posible destacar el excelente desempeño del mapeo de humedales localizados en el estado de Río de Janeiro. A través de la matriz de error generada en la validación del mapeo, se observa que el error de comisión fue mayor que el error de omisión y que, en general, el mapeo obtuvo un resultado altamente expresivo en su validación.

Tabla 2: Matriz de error de la clasificación de humedales utilizando imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2.

| Clasificación S1 + S2                   | Clasificación/Modelo |           |              | <b>Total</b> |
|---|----------------------|-----------|--------------|--------------|
|   | Clases               | Humedales | No humedales |              |
| <b>Referencia/<br/>Verdad Terrestre</b> | Humedales            | 112       | 28           | 140          |
|   | No humedales         | 4         | 96           | 100          |
|   | <b>Total</b>         | 116       | 124          | 240          |

Fuente: los autores (2025).

Los errores de comisión se refieren a la clasificación errónea de agua en áreas de sombra. De los 240 puntos de validación, solo 32 fueron clasificados de manera incorrecta, siendo 28 por errores de omisión y 4 por errores de comisión. Este resultado indica una baja presencia de errores de comisión y omisión en la clasificación.

Los errores estuvieron presentes en áreas de sombra y afloramientos rocosos, que fueron clasificados erróneamente como humedales, configurando errores de comisión. Este error estuvo presente en algunos puntos de validación debido a la escala del mapeo y a la escala de la máscara de pendiente utilizada en la clasificación, ya que la pendiente fue extraída del modelo digital de elevación SRTM, con resolución espacial de 30 metros, mientras que la clasificación se realizó con base en imágenes de 10 metros de resolución espacial. Por lo tanto, se produjeron algunos ruidos en la clasificación debido a esta inconsistencia de escala.

Por su parte, los errores de omisión corresponden a áreas planas que deberían haber sido clasificadas como humedales y no lo fueron. Este ruido puede haber sido reflejo de los patrones utilizados en la clasificación, así como de los índices espectrales que apoyaron el proceso. No obstante, se resalta que estos errores de omisión fueron considerados bajos y poco expresivos para el resultado de la validación, que presentó buenos valores de desempeño.

En relación con las métricas, la validación del mapeo indicó buenos resultados de desempeño, con una exactitud total de 0,87. La exactitud del productor, asociada al error de omisión, alcanzó 0,80, mientras que la exactitud del usuario, asociada al error de comisión, alcanzó 0,97. El F-score alcanzó 0,88, valor considerado alto al aproximarse a 1 y que se refiere al desempeño de la validación. Por su parte, el IoU, que se refiere a la superposición entre el área clasificada y la verdad terrestre, alcanzó un valor elevado de 0,78 (Tabla 3).

Tabla 3: Resultados de la validación de la clasificación final de humedales.

| Métricas de validación                                 | Validación de la clasificación |
|--|--------------------------------|
| Exactitud global (Overall accuracy)                    | 0,87                           |
| Índice Kappa   | 0,73                           |
| Exactitud del productor (Precisión / Error de omisión) | 0,80                           |
| Exactitud del usuario (Recall / Error de comisión)     | 0,97                           |
| F-score  | 0,88                           |
| IoU  | 0,78                           |

Fuente: los autores (2025).

El índice Kappa es un indicador desarrollado por Landis y Koch (1977) y puede definirse como una medida de asociación utilizada para describir y evaluar el grado de concordancia, es decir, la confiabilidad y precisión de la clasificación. El índice Kappa del mapeo presentó un valor de 0,73, considerado un resultado de clasificación muy bueno dentro de la escala del índice, lo que respalda su aplicación en investigaciones de carácter ambiental.

La necesidad de utilizar ambas series temporales se debió a su desempeño complementario, dado que las imágenes radar presentaron un excelente desempeño para espejos de agua, mientras que las imágenes ópticas tuvieron éxito en la clasificación de áreas con vegetación y humedad. Otro aspecto relevante en la elección del Sentinel-2 (óptico), junto con el Sentinel-1 (radar), se refiere a la posibilidad de alcanzar una resolución espacial de 10 metros, considerando las características y potencialidades de ambos sensores, así como su alta resolución temporal, lo que permite un análisis más completo de un fenómeno dinámico que varía su cobertura en cortos intervalos de tiempo.

La clasificación final permite analizar la dinámica espacio-temporal de los humedales cariocas, es decir, los datos relacionados con el régimen de inundación de los paisajes inundables localizados en el municipio de Río de Janeiro (Figura 3). Se estima que el 13% del territorio carioca está cubierto por humedales. Este porcentaje es bastante significativo y se localiza principalmente en la porción costera del municipio, en áreas de planicies asociadas a bahías, lagunas y estuarios, presentando variaciones significativas en los períodos y frecuencias de inundación.

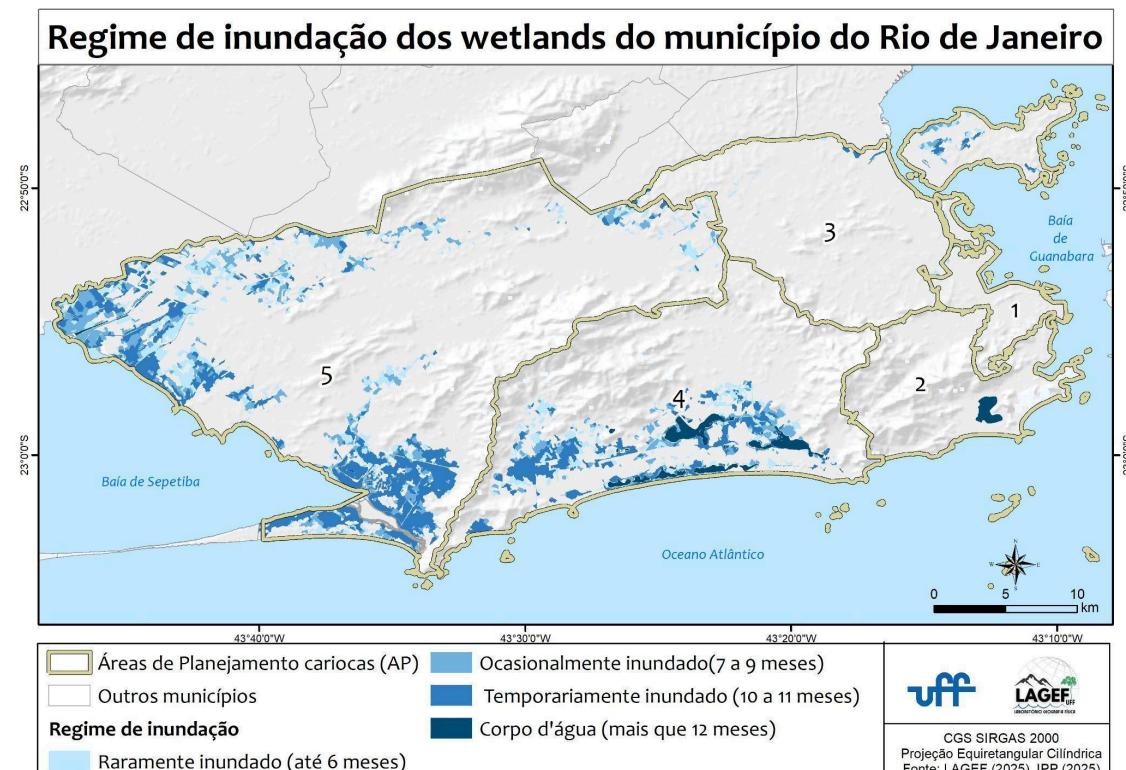


Figura 3: Régimen de inundación de los humedales cariocas.  
Fuente: los autores (2025)

En relación con el régimen de inundación, conforme a la adaptación de Costa (2025), se observa una clara gradación espacial: las áreas permanentemente inundadas están rodeadas por franjas temporalmente inundadas, seguidas por las ocasionalmente y raramente inundadas, que se distribuyen en las porciones más alejadas. Las áreas temporalmente inundadas representan la mayor extensión,

totalizando el 5,79% del territorio municipal, seguidas por las raramente inundadas (3,73%) y las ocasionalmente inundadas (3,42%). Los cuerpos de agua permanentes, que incluyen lagunas, canales y tramos de ríos, suman menos del 1% del paisaje, configurando los núcleos más estables del sistema hídrico (Tabla 4).

Tabla 4: Cuantificación del régimen de inundación de los humedales del municipio de Río de Janeiro.

| Clases                                 | Área (km <sup>2</sup> ) | %             |
|--|-------------------------|---------------|
| Raramente inundado (hasta 6 meses)     | 44,96                   | 3,73          |
| Ocasionalmente inundado (7 a 9 meses)  | 41,17                   | 3,42          |
| Temporalmente inundado (10 a 11 meses) | 69,69                   | 5,79          |
| Cuerpo de agua (36 meses)              | 10,56                   | 0,88          |
| <b>Área total de humedales</b>         | <b>166,37</b>           | <b>13,82</b>  |
| <b>Área total de otras coberturas</b>  | <b>1.037,78</b>         | <b>86,18</b>  |
| <b>Área total del municipio</b>        | <b>1.204,15</b>         | <b>100,00</b> |

Fuente: los autores (2025)

Estos resultados evidencian que los paisajes inundables de Río de Janeiro se organizan en un mosaico dinámico de estacionalidad. El predominio de áreas temporal y ocasionalmente inundadas refuerza el papel de los humedales como zonas de transición entre los ambientes acuáticos y terrestres, fundamentales para el control de la escorrentía superficial, la recarga hídrica y el mantenimiento de la biodiversidad local.

Al tratarse de un fenómeno cuya ocurrencia está limitada a factores como la humedad, los humedales son considerados sistemas terrestres dinámicos, especialmente en áreas tropicales como Río de Janeiro, que presenta una gran amplitud térmica a lo largo del año. Moore (2008) destaca que los humedales son ecosistemas dinámicos que se encuentran en constante estado de cambio. En este sentido, la ocurrencia de los humedales está condicionada por una temporalidad dinámica de los sistemas terrestres.

### 3.2 Humedales por Área de Planificación

La cuantificación de los humedales en las diferentes Áreas de Planificación (AP) del municipio evidencia variaciones tanto en su extensión como en el régimen de inundación. Las mayores proporciones de humedales se concentran en las AP5 (19,1%) y AP4 (16,2%), seguidas por la AP3 (3,2%), mientras que las AP1 y AP2 presentan una participación poco significativa, con el 1,6% y el 2,1% del área total, respectivamente (Tabla 5). Esta distribución pone de manifiesto el predominio de paisajes pantanosos y sistemas acuáticos en las porciones costeras y de baja altitud del territorio, especialmente en las planicies asociadas a bahías y sistemas lagunares.

Tabla 5: Clases del régimen de inundación por Áreas de Planificación del municipio de Río de Janeiro

| Classe                                 | AP 1            |            | AP 2            |            | AP 3            |            | AP 4            |             | AP 5            |             |
|--|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
|  | km <sup>2</sup> | %           | km <sup>2</sup> | %           |
| Raramente inundado (hasta 6 meses)     | 0,5             | 1,3        | -               | -          | 2,6             | 1,3        | 11,4            | 3,9         | 30,4            | 5,3         |
| Ocasionalmente inundado (7 a 9 meses)  | 0,1             | 0,2        | -               | -          | 1,8             | 0,9        | 8,9             | 3,0         | 30,3            | 5,3         |
| Temporalmente inundado (10 a 11 meses) | 0,0             | 0,1        | 0,1             | 0,1        | 2,1             | 1,0        | 19,0            | 6,5         | 48,2            | 8,4         |
| Cuerpo de agua (más de 36 meses)       | -               | -          | 2,0             | 2,0        | 0,0             | 0,0        | 8,2             | 2,8         | 0,3             | 0,0         |
| Total de humedales                     | 0,6             | <b>1,6</b> | 2,1             | <b>2,1</b> | 6,6             | <b>3,2</b> | 47,6            | <b>16,2</b> | 109,1           | <b>19,1</b> |
| No humedales                           | 33,8            | 98,4       | 98,3            | 97,9       | 196,9           | 96,8       | 246,2           | 83,8        | 462,9           | 80,9        |
| Área Total AP                          | 34,4            | 100,0      | 100,4           | 100,0      | 203,5           | 100,0      | 293,8           | 100,0       | 572,0           | 100,0       |

Fuente: los autores (2025)

En cuanto a los tipos de paisajes pantanosos existentes, se observan humedales de distintos orígenes y características físicas. En las franjas marginales de las Áreas de Planificación y en las zonas de bahía, principalmente en las AP3 y AP5, predominan los humedales costeros, caracterizados por vegetación de manglar y formaciones de restinga, adaptadas a las variaciones de salinidad y al régimen de mareas. Estas áreas representan ecosistemas de transición entre los ambientes terrestre y marino, con una función esencial en la retención de sedimentos y la protección de la línea de costa.

En la AP5, se destaca la presencia de la Bahía de Sepetiba (Figura 4), que alberga extensos sistemas estuarinos y manglares, fundamentales para el mantenimiento de la productividad biológica y el equilibrio hidrológico de la región. En la AP3, sobresalen las áreas de manglar ubicadas a lo largo de la Línea Roja (Linha Vermelha), especialmente en las proximidades de la Isla del Fundão, que representan remanentes significativos de ecosistemas costeros dentro de un tejido urbano consolidado.



Figura 4: Humedales presentes en las franjas marginales y áreas de bahía en Guaratiba.

Fuente: Oeco/Inea (2011).

En las AP1, AP2 y AP3 se identificaron pocas áreas de humedales, reflejo de la intensa urbanización y de las intervenciones hidráulicas que han alterado la dinámica natural de inundación. Aun así, la ocurrencia de inundaciones es común durante períodos de lluvias intensas, especialmente en las AP1 y AP3, donde extensas planicies fluviales se conectan con la Baixada Fluminense y presentan un historial de canalización y rectificación de cursos de agua.

En la AP2, la Laguna Rodrigo de Freitas se destaca como el principal cuerpo de agua natural aún preservado, mientras que la mayoría de los demás ríos se encuentran canalizados y presentan baja o nula incidencia de regímenes de inundación natural. Esta situación evidencia el grado de antropización de las áreas centrales y de media ladera del municipio, donde la expansión urbana ha reducido significativamente la presencia y la funcionalidad ecológica de los humedales.

En las áreas de planicies de inundación ubicadas en las porciones bajas de las distintas Áreas de Planificación, principalmente en las zonas norte y oeste, se identifican humedales fluviales, formados en áreas periódicamente inundadas y cubiertas por vegetación herbácea y arbustiva adaptada al encharcamiento estacional. En estos ambientes predominan las clases temporal y ocasionalmente inundadas, totalizando 27,9 km<sup>2</sup> (9,5% del área de la AP4), lo que refleja el comportamiento estacional del régimen hidrológico local.

En las áreas donde se desarrollan los extensos sistemas lagunares de Barra da Tijuca, Jacarepaguá y Marapendi (AP4) (Figura 5), se observa una marcada predominancia de humedales raramente, ocasionalmente y temporalmente inundados, que en conjunto totalizan 47,3 km<sup>2</sup>, lo que corresponde a aproximadamente el 16,1% del área de la AP4. Además, se destacan los cuerpos de agua permanentes, que suman 8,2 km<sup>2</sup> (2,8%), evidenciando la importancia hidrológica y ecológica de estos complejos lagunares. Estas regiones presentan una rica vegetación hidrófila, que incluye macrófitas acuáticas, juncos, totoras (*Typha domingensis*) y gramíneas adaptadas al anegamiento, además de zonas de

transición con restingas herbáceas y arbustivas. La flora contribuye al mantenimiento de la calidad del agua mediante la filtración de nutrientes y la retención de sedimentos, mientras que la fauna local está compuesta por aves acuáticas, peces, anfibios y reptiles que utilizan estas áreas como refugio, reproducción y alimentación.

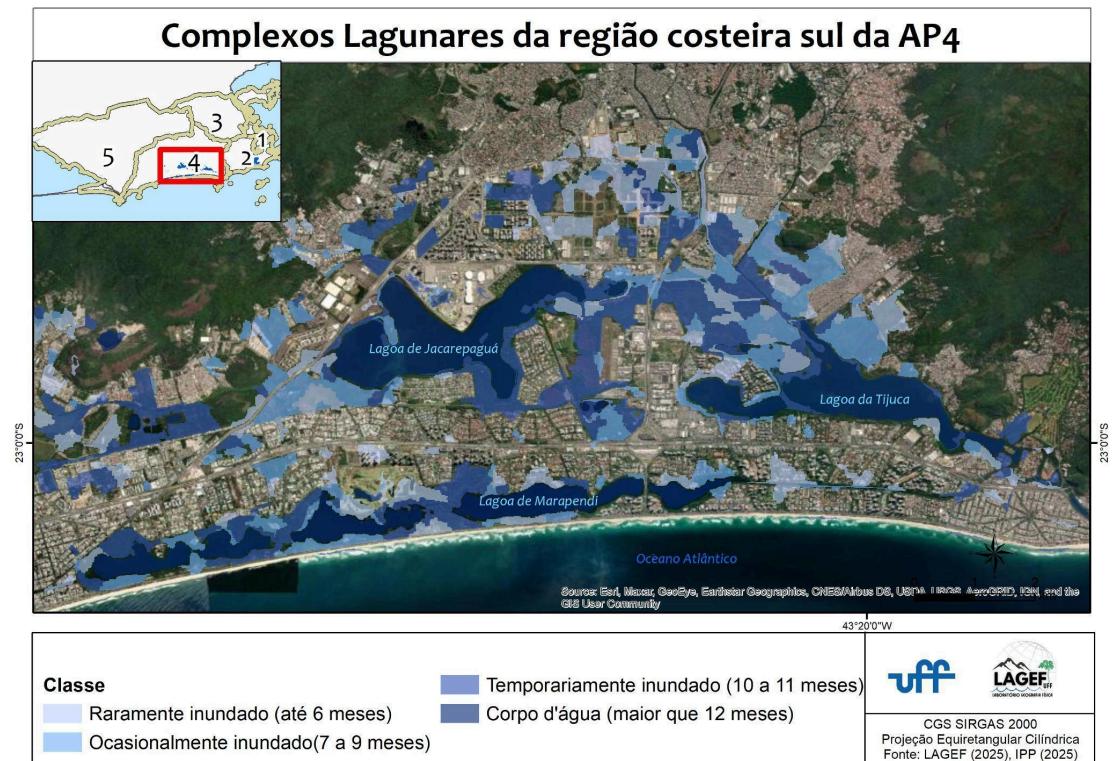


Figura 5: Detalle del régimen de inundación en la AP4, destacando los complejos lagunares de la región costera.

Fuente: los autores (2025).

A pesar de su alto valor ecológico, los complejos lagunares de la AP4 han venido sufriendo presiones crecientes derivadas del crecimiento urbano, asociadas a la expansión inmobiliaria, rellenos irregulares, canalización de ríos y vertido de efluentes domésticos e industriales. Estos procesos han promovido el asolvamiento, la reducción de las áreas inundables y el deterioro de la calidad del agua, afectando directamente a los ecosistemas acuáticos y a las especies dependientes de estos ambientes. De este modo, los humedales de la región de Barra constituyen uno de los sistemas húmedos más representativos y, al mismo tiempo, más vulnerables del municipio de Río de Janeiro, lo que exige estrategias urgentes de gestión ambiental y restauración ecológica.

Esta diversidad de tipologías de humedales resalta la importancia ecológica de estos ambientes en el equilibrio hidrológico, la conservación de la biodiversidad y la dinámica paisajística de la ciudad de Río de Janeiro. Situados en la interfaz entre el acelerado crecimiento urbano y económico de las últimas décadas y la complejidad del régimen natural de inundación, estos ecosistemas han sido presionados por procesos de ocupación desordenada, rellenos, impermeabilización del suelo y alteraciones en el flujo hídrico natural. La superposición entre las zonas de expansión urbana y las planicies inundables pone de manifiesto la necesidad de integrar la planificación urbana con la conservación de los humedales, con el fin de garantizar la resiliencia ambiental y la funcionalidad ecológica de estos sistemas frente a las transformaciones del territorio carioca.

## 4 Conclusión

Los resultados demuestran que los humedales están ampliamente distribuidos en los paisajes de la ciudad de Río de Janeiro, con una ocurrencia fuertemente asociada a las planicies costeras, fluviales, lagunares y de bahía. Esta distribución pone de manifiesto la estrecha relación de estos ambientes con la dinámica geomorfológica e hidrológica del municipio de Río de Janeiro. El mapeo basado en el régimen estacional de inundación permitió delimitar estos ambientes con mayor precisión en los mapas temáticos, destacando su relevancia ecológica y funcional.

La presencia significativa de áreas húmedas refuerza su importancia en la regulación hidrológica, la recarga de acuíferos y la conservación de la biodiversidad, así como su contribución a la mitigación de riesgos asociados a eventos extremos, proporcionando servicios ecosistémicos esenciales frente a los crecientes impactos de la urbanización y del cambio climático.

La integración de datos SAR y ópticos resultó eficaz para la identificación de las variaciones estacionales de inundación, confirmando el potencial de las técnicas de teledetección y de los enfoques de aprendizaje automático para el mapeo y el monitoreo continuo de los humedales a escala municipal. El enfoque metodológico adoptado permitió mejorar la precisión, la consistencia y la representatividad de los mapeos temáticos, contribuyendo a una mejor comprensión de la dinámica espacio-temporal de los humedales en el territorio carioca.

En este contexto, se destaca la necesidad de incorporar los humedales en las políticas de ordenamiento territorial y planificación urbana del municipio de Río de Janeiro. El monitoreo de estos ecosistemas puede considerarse una estrategia prioritaria de adaptación climática, dada la multiplicidad de servicios ambientales y sociales que estos ambientes ofrecen a la sociedad.

Uno de los principales desafíos en la clasificación de imágenes con este nivel de detalle está relacionado con la presencia de ruido y con la necesidad de compatibilizar los resultados con la escala cartográfica de análisis. En este sentido, los mapeos desarrollados en esta investigación se disponibilizaron a una escala compatible de hasta 1:50.000, adoptándose 1 hectárea como unidad mínima de mapeo, con el fin de garantizar una mayor consistencia espacial y reducir los efectos de fragmentación excesiva.

Otro desafío enfrentado en la clasificación híbrida se refiere a las limitaciones impuestas por el uso de imágenes ópticas con una resolución espacial de 10 metros, lo que restringió el análisis a un único índice radiométrico (NDWI) y al uso de bandas ubicadas exclusivamente en los rangos espectrales del visible y del infrarrojo cercano. Esta restricción se debió a la necesidad de integrar datos de diferentes sensores, tanto ópticos (MSI) como de radar (SAR), de manera combinada, respetando la resolución espacial original de ambos, establecida en 10 metros.

Como proyecciones futuras de la investigación, se destacan perspectivas relevantes para profundizar el conocimiento y la gestión de los humedales. Una de ellas consiste en el análisis de la conectividad espacial entre estos ambientes, con el objetivo de identificar áreas más vulnerables a la fragmentación, así como aquellas con potencial para la formación de corredores ecológicos, esenciales para el mantenimiento de la biodiversidad y de los flujos ecológicos. Otra posibilidad se refiere al análisis y la cuantificación de los servicios ecosistémicos prestados por las distintas tipologías de humedales, como el secuestro y el almacenamiento de carbono, que desempeñan un papel fundamental en la mitigación del cambio climático. Además, la aplicación operativa del modelo propuesto puede contribuir al monitoreo continuo de estos ambientes, optimizando las acciones de gestión ambiental y apoyando los procesos de toma de decisiones en la planificación territorial.

## Referencias

- BELGIU, M.; DRAGUT, L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 114, p. 24-31, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>;
- BRASIL. Código Florestal Brasileiro - Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2012. Disponível en: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm). Acceso en: 16 jul. 2020.
- BRASIL. Decreto nº 1.905, de 16 de maio de 1996. Promulga a Convenção Relativa às Zonas Úmidas de Importância Internacional, especialmente como Habitat de Aves Aquáticas (Convenção de Ramsar), de 2 de fevereiro de 1971. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília**, DF, 17 mai. 1996.
- BRASIL. Decreto nº 10.141, de 28 de novembro de 2019. Dispõe sobre a implementação da Convenção sobre Zonas Úmidas de Importância Internacional, especialmente como Habitat de Aves Aquáticas (Convenção de Ramsar), e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 29 nov. 2019.
- BRASIL. Recomendação CNZU n.º 07, de 11 de junho de 2015. Brasília, DF. 2015. Disponível en <https://antigo.mma.gov.br/comunicacao/item/10872-comit%C3%AA-nacional-de-zonas-%C3%BAmidas.html>. Acceso en: 20 abr. 2022.
- CARDOSO, Daniel da Silva. **Uso de séries temporais do sensor Sentinel-1 SAR na análise de áreas inundáveis nos rios Madeira e Canumã no estado do Amazonas, Brasil**. Monografia de Bacharel em Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2022.
- CARVALHO JÚNIOR, O.A.C. Aplicações e perspectivas do Sensoriamento Remoto para o mapeamento de áreas inundáveis. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 35, n. 4, 2018.
- COSTA, Evelyn de Castro Porto. **Wetlands do Estado do Rio de Janeiro: Identificação, Classificação e Estado Ambiental das Paisagens Pantanosas**. 2025. 177 f.: il. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2025.
- CUNHA, C.N; PIEDADE, M.T.F; JUNK, W. J. (Ed.). **Classificação e delineamento das áreas úmidas brasileiras e de seus macrohabitats**. Cuiabá: EdUFMT, 2014.
- CUTLER, Adele; CUTLER, D. Richard; STEVENS, John R. Random forests. In: **Ensemble machine learning: Methods and applications**, p. 157-175, 2012.
- EMBRAPA. **Sentinel: Missão Sentinel**. Disponível en: <https://www.embrapa.br/satelite-de-monitoramento/missoes/sentinel>. Acceso en: 25 ene. 2024.
- EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). Sentinel online. **User Guides**. Disponível en: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides>. Acceso en: 25 ene. 2024.
- IBGE. **Censo Demográfico 2022**: resultados gerais da população e dos domicílios. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível en: <https://censo2022.ibge.gov.br/>. Acceso en: 10 nov. 2025.
- JAMALI, Ali *et al.* Deep Forest classifier for wetland mapping using the combination of Sentinel-1 and Sentinel-2 data. **GIScience & Remote Sensing**, v. 58, n. 7, p. 1072-1089, 2021.
- JUNK, W.J *et al.* Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification, for research, sustainable management, and protection. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**. v. 24, n. 1, p. 5-22, 2014.

LONGLEY, P.A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Sistemas e Ciéncia da Informação Geográfica**. Porto Alegre. Bookman, 2013.

MAGALHÃES, Ivo Augusto Lopes. **Análise de inundações e classificação da cobertura vegetal no bioma amazônico usando séries temporais sentinel-1 SAR e técnicas de Deep Learning**. 2022. 122 f., il. Tese (Doutorado em Geografia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

MAHDIANPARI, Masoud *et al.* The first wetland inventory map of newfoundland at a spatial resolution of 10 m using Sentinel-1 And Sentinel-2 data on the Google Earth Engine cloud computing platform. **Remote Sensing**, v. 11, n. 1, p. 43, 2018.

MAUS, V.; CÂMARA, G.; CARTAXO, R.; SANCHEZ, A.; RAMOS, F.M.; de QUEIROZ, G.R. A Time-Weighted Dynamic Time Warping Method for Land-Use and Land-Cover Mapping. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, 2016, 9, 3729–3739.

MOORE, Peter D. **Ecosystems: Wetlands**. Revised Edition. New York, NY, 2005.

MOREIRA, Maurício Alves. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicação**. 4. ed., Viçosa, MG, Editora UFV, 2011.

OLOFSSON, Pontus *et al.* Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. **Remote Sensing of Environment**, v. 148, p. 42-57, 2014.

PARADELLA, Waldir Renato *et al.* Radares imageadores nas Geociências: estado da arte e perspectivas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 1, p. 56-62, 2005.

PCRJ - Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro. **Plano Diretor da Cidade**. Lei Complementar nº111 de 1 de fevereiro de 2011.

PONZONI, Flávio Jorge; SHIMABUKURO, Yosio Edemir; KUPLICH, Tatiana Mora. **Sensoriamento remoto da vegetação**. Oficina de textos, 2015.

RUSSI, D. *et al.* **The Economics of Ecosystems and Biodiversity for Water and Wetlands**. IEEP, London; Brussels; Gland: Ramsar Secretariat, Gland, 2013.

SEABRA, V. S. ; ROCHA-LEÃO, O. M. Razões para as enchentes e inundações no residencial carlos marighella: uma análise multitemática da bacia do rio do vigário, em Maricá-RJ. **Revista da ANPEGE**, v. 15, n. 26, p. 114-137, 2019.

SILVA, Fabricio Sousa; PESTANA, Adauto Luis Moraes. Mapeamento da cobertura hídrica da microrregião da Baixada Maranhense com dados do sensor SAR Sentinel 1A. **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 1, n. 2, 2021.

SLAGTER, Bart *et al.* Mapping wetland characteristics using temporally dense Sentinel-1 and Sentinel-2 data: A case study in the St. Lucia wetlands, South Africa. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 86, p. 102009, 2020.

TAMIMINIA, Haifa *et al.* Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 164, p. 152-170, 2020.

TEIXEIRA, S. G. **Radar de abertura sintética aplicado ao mapeamento e reconhecimento de zonas úmidas costeiras**. 2011. 127p. Tese (Doutorado em Geologia). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

## Sobre los Autores

Evelyn de Castro Porto Costa es investigadora posdoctoral en Geografía en la Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ). Posee doctorado en Geografía por la Universidad Federal Fluminense (UFF), maestría por la Universidad del Estado de Río de Janeiro (UERJ/FFP), licenciatura por la UERJ/FFP y bachillerato en Geografía por la UFF. Actualmente es profesora adjunta de Geociencias/Geotecnologías del Departamento de Licenciatura en Geografía del

Instituto de Geografía de la Universidad del Estado de Río de Janeiro – Campus Cabo Frio (UERJ/CF). Es miembro de los grupos de investigación del Laboratorio Espacio de Teledetección y Estudios Ambientales (UFRJ) y del Laboratorio de Geografía Física (UFF). Desarrolla investigaciones en el ámbito de la geoinformación, la cartografía, la teledetección y las geotecnologías aplicadas a la planificación territorial y ambiental, así como a la enseñanza de la geografía.

Raúl Sánchez Vicens es licenciado en Geografía por la Universidad de La Habana (1991), magíster en Geografía por la Universidad Federal de Río de Janeiro (1997) y doctor en Geografía por la Universidad Federal de Río de Janeiro (2003). Actualmente es profesor titular de la Universidad Federal Fluminense. Posee amplia experiencia en el área de las Geociencias, con énfasis en Teledetección, actuando principalmente en los siguientes temas: monitoreo de la cobertura vegetal y del uso del suelo; dinámica, evolución y estabilidad de los paisajes; y clasificación y cartografía del paisaje.

### **Contribuciones de los Autores**

Conceptualización, [E.C.P.C., R.S.V.]; metodología, [E.C.P.C., R.S.V.]; validación, [E.C.P.C., R.S.V.]; análisis formal, [E.C.P.C., R.S.V.]; redacción—preparación del borrador original, [E.C.P.C., R.S.V.]; redacción—revisión y edición, [E.C.P.C., R.S.V.]; supervisión, [R.S.V.]. Todos los autores leyeron y aprobaron la versión publicada del manuscrito.

### **Financiación**

Este trabajo fue realizado con el apoyo de la Coordinación para el Perfeccionamiento del Personal de Nivel Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamiento 001.

### **Disponibilidad de Datos**

Los datos utilizados en esta investigación pueden estar disponibles previa solicitud.

### **Conflictos de Interés**

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

### **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 multidisciplinarios enviados a la revista respondan a las necesidades de desarrollo urbano de Río de Janeiro.