

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales Y
Puertos



**Alteraciones del paisaje natural por las
acciones antrópicas. Análisis
comparativo de distintas ciudades en
América Latina**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Silvia Viviana González Rodríguez

Ingeniera Civil

Máster en Sistemas de Ingeniería Civil

Madrid, 2024



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales Y Puertos

Doctorado en Sistemas de Ingeniería Civil

**Alteraciones del paisaje natural por las
acciones antrópicas. Análisis
comparativo de distintas ciudades en
América Latina**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Silvia Viviana González Rodríguez

Ingeniera Civil

Máster en Sistemas de Ingeniería Civil

Bajo la dirección de:

Dr. Vicente Negro Valdecantos

Madrid, 2024

Título: Alteraciones del paisaje natural por las acciones antrópicas. Análisis comparativo de distintas ciudades en América Latina.

Autor: Silvia Viviana González Rodríguez

Programa de Doctorado: Doctorado en Sistemas de Ingeniería Civil

Dirección de tesis:

Dr. Vicente Negro Valdecantos

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

Dedicatoria

*El tiempo que no invertimos en fabricar memorias,
afianzar los recuerdos y soltarnos unas risas,
y que invertí, en cambio,
en realizar esta investigación y redactar esta tesis,
lo dedico transformado en amor del bueno y genuino agradecimiento,
a mis padres, a mi amor, a mis tíos,
y en especial, a mi nonita Mechas, en el cielo.*

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por sostenerme durante el desarrollo de esta investigación y a lo largo de mi vida. Su bendición me ha brindado la sabiduría y el discernimiento necesarios para alcanzar con éxito las metas establecidas.

En el plano terrenal, expreso mi más sincero agradecimiento a *Vicente Negro*. Su apasionado amor por el paisaje litoral me ha transmitido una energía y unos conocimientos invaluable, sin los cuales no habría sido posible orientar tan certeramente esta investigación. Gracias también por la paciencia, porque a pesar de que la monotonía del trabajo y las obligaciones originaron el distanciamiento esporádico de la investigación, siempre estuvo en primera línea de guerra, batallando junto a mí cada retorno y reconstruyendo el barco que nos permitiera llegar a buen puerto.

Quiero agradecer también al profesor *Javier Diez (QEPD)*, con quien tuve el privilegio de compartir una parte del camino, una de las grandes mentes que he conocido, la calma con la que me entregó sus conocimientos permitió que floreciera en mí interior el deseo de estudiar más, de conocer más, de dejarme llevar por la dinámica litoral y encaminarme hacia el estudio de esta tesis doctoral.

A la *Fundación Agustín de Betancourt* por la financiación de las publicaciones de dos de los casos de estudio de esta investigación.

A mi madre, cuyo amor incondicional me ha dado la vida. A mi padre, que, aunque no me dio la vida, la enriquece con su presencia y cariño. Ambos, con su dedicada educación, me han permitido establecer metas claras en mi vida. Gracias a la confianza que han depositado en mí, he desarrollado la seguridad necesaria para asumir y cumplir a cabalidad cada reto que se me ha presentado.

A mis tíos, quienes abrieron las puertas de su hogar para acogernos y brindarnos refugio. Su cálida acogida, junto a la de mis primos, ha sido fundamental para que pudiera continuar este camino, gracias a su apoyo y constante empuje he podido llegar hasta el final.

A mi amor, porque sin su presencia no tendría la calma necesaria para transitar este camino. Sin su incondicional apoyo, no habría tenido el tiempo requerido para dedicarme a esta labor. Y sin su compañía, simplemente no habría alcanzado la felicidad que hoy me embarga al culminar esta etapa.

Abstract

This research corresponds to a deep analysis of the relationship between human beings and their environment, examining the landscape as the perception of humanity before nature, interacting with the ecosystem until integrating it into development and life itself, incorporating constructions that alter the natural landscape. It represents the expression and footprint of the human being in the territory, as well as their experience of inhabiting the world, turning the site into their place.

Engineering projects and urban growth generate an impact that transforms the environment. However, the concept of landscape only arises with the presence of civilization. This interaction has gone through four phases: submission, adaptation, conquest and respect. As a result, and with a landscape approach, the transformation of the coastline is evaluated through the concepts of natural landscape, built landscape, destroyed landscape and reconstructed landscape.

The coastline is established as the symbolic and dynamic border between the continent and the ocean. The analysis has been carried out through the comparison of the coastline of three case studies that follow the same research method, which consists of the comparison of two cartographic maps from different historical periods. The first map corresponds in the three cases to historical plans from the colonial era. The second map is the result of a composite image from aerial photographs obtained with Google Earth at the present time. The process is divided into three stages. In the initial phase of the process, the maps were georeferenced using QGis, and later vectorized using the AutoCAD design software. In the second stage, the maps were overlaid to identify changes in the coastline. Finally, the surface differences were calculated and quantified, grouping them into accretion or erosion.

The evolution of the coastlines in the three case studies analyzed has been marked by a complex interaction between natural factors and human activities.

The chronological analysis of the evolution of the coastlines in these three case studies allows us to understand how the alteration of the coastal landscape responds to common patterns, regardless of the colonial origin of the populations that have intervened in these territories.

During the investigation of the case studies, the objectives were established as the analysis of the historical evolution of the coastline in Cartagena de Indias, Rio de

Janeiro and New Orleans, and the quantification of the accretion and erosion processes in each case study, in order to finally compare the results obtained between the three case studies and identify the common patterns in the alteration of the coastal landscape, beyond the colonial origin of the populations.

Finally, the research findings are that the Bay of Cartagena de Indias presents a negative balance of 1.22 km², with predominant erosion due to the felling of mangroves and meadows. The Guanabara Bay and the east coast of Rio de Janeiro show a positive balance of 14.5 km², but with a worrying loss of 23.3 km² of mangroves. And Lake Pontchartrain, including the coast of New Orleans, records an alarming net loss of 36.42 km², with erosion associated with natural processes and human activities.

In conclusion, the comparative analysis shows that the alteration of the coastal landscape responds to common patterns, regardless of the colonial origin of the populations. Likewise, these findings demonstrate the need to adopt more sustainable territorial planning and management approaches, which harmonize human development with the preservation of coastal ecosystems.

Resumen

Esta investigación corresponde a un análisis profundo de la relación entre el ser humano y su entorno, examinando el paisaje como la percepción de la humanidad ante la naturaleza, interactuando con el ecosistema hasta integrarla en el desarrollo y la vida misma, incorpora construcciones que alteran el paisaje natural. Representa la expresión y la huella del ser humano en el territorio, así como su experiencia de habitar el mundo, convertir el sitio en su lugar.

Los proyectos de ingeniería y el crecimiento urbano generan un impacto que transforma el entorno. Sin embargo, el concepto de paisaje solo surge con la presencia de la civilización. Esta interacción ha atravesado por cuatro fases: sumisión, adaptación, conquista y respeto. Como resultado y con un enfoque paisajístico se evalúa la transformación del litoral a través de los conceptos de paisaje natural, paisaje construido, paisaje destruido y paisaje reconstruido.

La línea de costa se establece como la frontera simbólica y dinámica entre el continente y el océano. El análisis ha sido llevado a cabo a través de la comparación de la línea de costa de tres casos de estudio que siguen el mismo método de investigación que consiste en la comparación de dos mapas cartográficos de diferentes períodos históricos. El primer mapa corresponde en los tres casos a planos históricos de la época colonial. El segundo mapa es el resultado de una imagen compuesta a partir de fotografías aéreas obtenidas con Google Earth en la actualidad. El proceso se divide en tres etapas. En la fase inicial del proceso, los mapas fueron georreferenciados utilizando QGis, y posteriormente vectorizados mediante el uso del software de diseño AutoCAD. En la segunda etapa, se superpusieron los mapas para identificar los cambios en la línea de costa. Por último, se calcularon y cuantificaron las diferencias de superficie agrupándolas en acreción o erosión.

La evolución de las líneas costeras en los tres casos de estudio analizados ha estado marcada por una compleja interacción entre factores naturales y actividades humanas.

El análisis cronológico de la evolución de las líneas de costa en estos tres casos de estudio permite comprender cómo la alteración del paisaje litoral responde a patrones comunes, independientemente del origen colonial de las poblaciones que han intervenido en estos territorios.

Durante la investigación de los casos de estudio se estableció como objetivos el análisis de la evolución histórica de la línea de costa en Cartagena de Indias, Río de Janeiro y Nueva Orleans y la cuantificación de los procesos de acreción y erosión en cada caso de estudio, para finalmente comparar los resultados obtenidos entre los tres casos de estudio e identificar los patrones comunes en la alteración del paisaje litoral, más allá del origen colonial de las poblaciones.

Finalmente, los hallazgos de la investigación son que la Bahía de Cartagena de Indias presenta un balance negativo de 1.22 km², con una erosión predominante debido a la tala de manglares y praderas. La Bahía de Guanabara y la costa este de Río de Janeiro muestra un saldo positivo de 14.5 km², pero con una preocupante pérdida de 23.3 km² de manglares. Y el Lago Pontchartrain, incluida la costa de Nueva Orleans registra una alarmante pérdida neta de 36.42 km², con la erosión asociada a procesos naturales y actividades humanas.

En conclusión, el análisis comparativo evidencia que la alteración del paisaje litoral responde a patrones comunes, independientemente del origen colonial de las poblaciones. Así mismo, estos hallazgos demuestran la necesidad de adoptar enfoques de planificación y gestión territorial más sostenibles, que armonicen el desarrollo humano con la preservación de los ecosistemas costeros.

Tabla de Contenido

<i>Agradecimientos</i>	<i>iii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iv</i>
<i>Resumen</i>	<i>vi</i>
<i>Lista de Figuras</i>	<i>x</i>
<i>Lista de Tablas</i>	<i>xiii</i>
<i>Abreviaturas y Acrónimos</i>	<i>xiv</i>
1. Introducción	17
2. Estado del Arte y Casos de Estudio	25
2.1. Estado del Arte del Paisaje	25
2.2. Dialéctica Ambiental, Erosión y Acreción Costera.....	35
2.2.1. Dialéctica Ambiental	35
2.2.2. Erosión Costera	36
2.2.3. Acreción Costera.....	37
2.3. Cartagena de Indias, Colombia.....	38
2.3.1. Condiciones climáticas, físicas y geomorfológicas.....	43
2.3.2. Transformación del paisaje costero	46
2.3.3. Resultados, análisis y discusión.....	48
2.4. Rio de Janeiro, Brasil	57
2.4.1. Condiciones climáticas, físicas y geomorfológicas.....	59
2.4.2. Transformación del paisaje costero	64
2.4.3. Resultados, análisis y discusión.....	70
2.5. Nueva Orleans, EEUU	84
2.5.1. Condiciones climáticas, físicas y geomorfológicas.....	87
2.5.2. Transformación del paisaje costero	89
2.5.3. Resultados, análisis y discusión.....	106
3. Material y métodos	123
3.1. Método de análisis, casos de estudio.....	123
3.1.1. Cartagena de Indias, Colombia.....	125
3.1.2. Rio de Janeiro, Brasil	128
3.1.3. Nueva Orleans, EE.UU.	131
3.2. Método de comparación de los casos de estudio	134

4. Resultados	135
4.1. Tabulación de resultados de los casos de estudio.....	135
4.2. Comparación de los resultados obtenidos.....	138
4.2.1. Influencia de la geomorfología	139
4.2.2. Influencia histórica.....	140
4.2.3. Factores de transformación del paisaje	140
5. Discusión	143
6. Conclusiones	149
7. Futuras líneas de investigación	154
Referencias	155
Apéndices: Criterios de Calidad	165
Artículo nº1. Comparing the Effects of Erosion and Accretion along the Coast of Cartagena De Indias, Colombia	166
Artículo nº2. Comparing the Effects of Erosion and Accretion along the Eastern Coast of Río de Janeiro and Guanabara Bay in Brazil	187
Artículo nº3. Comparing the Effects of Erosion and Accretion along the Coast of Pontchartrain Lake and New Orleans in EE.UU.	216
Anexos	244

Lista de Figuras

Figura 1.1: Cartagena de Indias, vista desde el noroccidente en 1739.....	20
Figura 1.2: Pan de Azúcar en el siglo XVI, pintura de T. Taylor.....	21
Figura 1.3: Mapa del siglo XVIII asentamiento colonial de Nueva Orleans	21
Figura 2.1: Clasificación de los Paisajes según la Intervención Humana.	27
Figura 2.2: Paisaje natural, Isla Tierra Bomba año 2000.....	30
Figura 2.3: Paisaje construido, Fuerte de San Fernando de Bocachica, 2000.....	31
Figura 2.4: Paisaje destruido, vista aérea Bocagrande y El Laguito, 2018.....	31
Figura 2.5: Representación Playa Copacabana por GUTA años 1893 y 1927.....	32
Figura 2.6: Representación Playa Copacabana por GUTA años 1956 y 2012.....	33
Figura 2.7: Localización de Cartagena de Indias, Colombia.....	38
Figura 2.8: Primer plano conocido de Cartagena de Indias. 1570.	39
Figura 2.9: Defensas de Cartagena de Indias, vista noroccidente en 1739.	40
Figura 2.10: Fortificaciones sucesivas de la bahía de Cartagena de Indias.....	41
Figura 2.11: Estimación del ascenso del nivel del mar en Colombia (en mm). ...	44
Figura 2.12: Topografía y batimetría de la Bahía de Cartagena de Indias.....	45
Figura 2.13: Fortificación San José de Bocachica, 1741.....	46
Figura 2.14: Vista aérea de la bahía de Cartagena de Indias en 1741.	48
Figura 2.15: Vista aérea de la bahía de Cartagena de Indias en 2018.	48
Figura 2.16: Superposición líneas de costa 1780 vs 2018.....	49
Figura 2.16: Escollera de la Marina, plano de 1765 y acreción en planta.	51
Figura 2.17: Escollera de Bocagrande, plano de 1771 y acreción en planta.....	52
Figura 2.19: Sector de localización del barrio La Matuna.....	53
Figura 2.20: Cálculo de áreas de acreción Isla Manga e Isla Diablo	54
Figura 2.21: Cálculo de áreas de acreción Islas Cocosolo, Facunda, y Brujas	55
Figura 2.22: Cálculo de áreas de erosión de Isla Abanico	56
Figura 2.23: Localización georreferenciada de la Bahía de Guanabara	57

Figura 2.24: Calidad del agua de la bahía de Guanabara.....	61
Figura 2.25: Topografía y batimetría del canal de entrada en la Bahía Guanabara.....	63
Figura 2.26: Geomorfología costera de la Bahía Guanabara.	64
Figura 2.27: Superposición isla Fundación e islas originales.	69
Figura 2.28: Superposición y áreas de acreción y erosión.	71
Figura 2.29: Región de las Playas de la Bahía (Região Praias da Baía).....	75
Figura 2.30: Mapa de los barrios de São Domingos, Boa Viagem e Ingá	78
Figura 2.31: Acreción Isla de Gobernador por obra Aeropuerto	82
Figura 2.32: Cambios del litoral de las zonas del XVII al XXI.....	84
Figura 2.33: Localización de Nueva Orleans	85
Figura 2.34: Mapa del siglo XVIII lago Pontchartrain, Bayou St. John y otros .	86
Figura 2.35: Fuerte San Carlos, 1796	91
Figura 2.36: Localización de los cuatro fuertes, Nueva Orleans.....	92
Figura 2.37: Desembocadura del río Mississippi en el Mar Caribe	93
Figura 2.38: Habitation de l'auteur sur le fleuve	94
Figura 2.39: Principales desagües y barrios de Nueva Orleans	96
Figura 2.40: Localización de los 4 puntos del proyecto Lafitte Blueway	98
Figura 2.41: Proyección corredores y áreas de drenaje transformadas proyecto Lafitte Blueway.....	98
Figura 2.42: Elevaciones de diseño del sistema de protección contra inundaciones.....	100
Figura 2.43: Plaza de peaje del sur de la calzada del lago Pontchartrain, Metairie.	102
Figura 2.44: Arranque norte Causeway Lake Pontchartrain, Mandeville.....	102
Figura 2.45: Superposición y comparación de líneas de costa 1853-2023.	106
Figura 2.46: Mapa de acreción por el proyecto de Lakefront.	109
Figura 2.47: West End a la derecha, y Spanish Fort y Milneburg en 1922.....	110
Figura 2.48: Distancia desde Fuerte St. John hasta desembocadura actual. ...	111

Figura 2.49: Erosión y acreción en zonas VIII-XII.	112
Figura 2.50: El pantano de Maurepas, en el sureste de Luisiana	114
Figura 2.51: Acreción en la zona XIV Mandeville.	115
Figura 2.52: División Lewisburg.	116
Figura 2.53: Parroquia de St. Tammany, Luisiana EE. UU.....	117
Figura 2.54: Erosión en la zona XV Refugio de St. Tammany.....	118
Figura 2.55: Acreción en la zona XVI Refugio Nacional de Vida Silvestre de Big Branch Marsh.....	118
Figura 2.56: Erosión y acreción en la zona XVII Bahía Irlandesa.....	119
Figura 2.57: Pérdida masiva de tierra prevista en los próximos 50 años.....	120
Figura 2.58: Tipo de costa en el Lago Pontchartrain y Nueva Orleans.....	121
Figura 2.59: Erosión y acreción línea de costa Lago Pontchartrain	121
Figura 2.60: Cuantificación erosión y acreción costa del lago Pontchartrain, ..	122
Figura 3.1: Mapa Histórico, Cartagena de Indias, 1780.	126
Figura 3.2: Mapa Actual, Cartagena de Indias, 2018.	127
Figura 3.3: Mapa Histórico, Río de Janeiro y Bahía de Guanabara, 1869.....	129
Figura 3.4: Mapa Actual, Río de Janeiro y Bahía de Guanabara, 2022.	130
Figura 3.5: Mapa Histórico, Nueva Orleans, Lago Pontchartrain, 1853.....	132
Figura 3.6: Mapa Actual, Nueva Orleans, Lago Pontchartrain, 2023.....	133
Figura 4.1: Mapa conceptual, factores de transformación del paisaje.....	142
Figura 5.1: Cartagena de Indias, sectores estudiados.....	144
Figura 5.2: Bahía Guanabara y Río de Janeiro, sectores estudiados.	145
Figura 5.3: Lago Pontchartrain y Nueva Orleans, sectores estudiados.	146

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Balance final, erosión o acreción de Cartagena de Indias, Colombia..	50
Tabla 2.2: Balance final, erosión o acreción de la costa este de Río de Janeiro y la Bahía de Guanabara, Brasil.....	72
Tabla 2.3: Balance final, erosión o acreción de la línea de costa del Lago Pontchartrain y Nueva Orleans	107
Tabla 4.1: Resultados en porcentaje del primer caso de estudio,.....	135
Tabla 4.2: Resultados en porcentaje del segundo caso de estudio,	136
Tabla 4.3: Resultados en porcentaje del tercer caso de estudio,	137
Tabla 4.4: Comparación resultados de los casos de estudio	138

Abreviaturas y Acrónimos

UPM	Universidad Politécnica de Madrid
EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental)
INVEMAR	Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras de Colombia
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
INGEOMINAS	Instituto Colombiano de Geología y Minería
SPRC	Sociedad Portuaria Regional de Cartagena
COMPAS	Sociedad Portuaria Compañía de Puertos Asociados S.A.
MSL	(Mean Sea Level) - Nivel medio del mar
SAV	(Submerged Aquatic Vegetation) - Vegetación acuática sumergida
SLFPA	(Southeast Louisiana Flood Protection Authority) - Autoridad de Protección contra Inundaciones del Sureste de Luisiana
MR&T	(Mississippi River & Tributaries) - Río Mississippi y Afluentes
PDBG	(Programa de Descontaminación de la Bahía de Guanabara) - Programa de Rehabilitación Ambiental de la Bahía de Guanabara
CPRA	(Coastal Protection and Restoration Authority) - Autoridad de Protección y Restauración Costera
LDWF	Louisiana Department of Wildlife and Fisheries (Departamento de Vida Silvestre y Pesca de Luisiana)
MWMA	Manchac Wildlife Management Area (Área de Gestión de la Fauna Salvaje de Manchac)
NAD 83	North American Datum of 1983 (Datum Norteamericano de 1983)
UTM	Universal Transverse Mercator (Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator)

WGS84	World Geodetic System 1984 (Sistema geodésico global estándar de 1984)
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Colombia)
MAGNA-SIRGAS	Marco de Referencia Geocéntrico Nacional (Colombia)
SAD 69/IBGE	South American Datum 1969 (Datum Sudamericano 1969)
QGIS	Quantum Geographic Information System (Sistema de Información Geográfica)
SIG	Sistema de Información Geográfica

1. Introducción

Desde su aparición, la especie humana ha mantenido una relación de interdependencia con el entorno natural que lo rodea, pero que de forma simultánea le ha proveído los recursos esenciales para su subsistencia. En las etapas iniciales de la evolución humana, la supervivencia dependía principalmente de la capacidad del ser humano para adaptarse y aprovechar los elementos del ecosistema circundante. Factores como el desarrollo de herramientas, la organización social y la comunicación simbólica fueron fundamentales para que el ser humano lograra prevalecer frente a las fuerzas de la naturaleza. Esta relación simbiótica entre el ser humano y su entorno ha dado lugar a una percepción cognitiva del mundo que nos rodea. Dicha percepción ha permitido a la humanidad identificar, clasificar y utilizar los componentes del medio ambiente como recursos para su desarrollo, comprender las dinámicas ecosistémicas y transformar el espacio en un territorio habitable, dotado de significado cultural. Con este proceso de transformación la especie humana ha conseguido habitar el “sitio”, impregnarlo con sus vivencias, ponerle alma, y convertirlo en su propio “lugar”.

Sin ahondar en la historia de las civilizaciones, durante el desarrollo de esta tesis nos permitiremos mencionar las etapas de percepción del medio físico, que lo transforma desde “sitio” a “lugar” (en inglés, de “site” a “place”), siguiendo el principio utilizado por Alexander Pope en el diseño paisajístico y de jardín en la Epístola IV, que consiste en la adaptación de los diseños al contexto en que se ubican, dotándolo del “genius loci” romano, el espíritu protector de lugar.

Se pueden identificar cuatro etapas de percepción clave en la evolución de la relación entre el ser humano y su entorno. Estas etapas se caracterizan por patrones distintivos en la forma en que la humanidad ha transformado los espacios naturales en lugares habitables, adaptándose e interactuando con el medio ambiente.

La primera se conoce como la *"etapa de sumisión"*. En este período, el ser humano percibía a la naturaleza como una fuerza abrumadora y temible. Como resultado, las primeras ciudades se construían alejadas de la costa, buscando protección contra las tormentas y los ataques de piratas. Durante esta etapa, la humanidad comenzó a observar y modificar sus costumbres para adaptarse al medio, dando paso a la siguiente fase.

La "*etapa de adaptación*" se caracteriza por una optimización en el uso de los recursos naturales y el desarrollo de formas de convivencia dentro del marco de la ciudad (sedentarismo). Es en este momento cuando el ser humano logra una mayor integración con su entorno, convirtiéndolo en un "*lugar*" habitable.

Posteriormente, la humanidad se ha apropiado del territorio y demuestra su poder y dominio sobre la naturaleza a través de la majestuosidad de sus obras. Esto marca la entrada en la "*etapa de la conquista*". En esta fase, la humanidad ha tenido a su disposición el conocimiento, la formación, las herramientas y la tecnología necesarias para superar los obstáculos que el medio ambiente les impone. Las grandes construcciones humanas envían un mensaje directo y claro sobre nuestra posición dominante en el planeta. Sin embargo, los excesos de superioridad de nuestra especie han atentado contra los ecosistemas, lo que en algunos casos ha conllevado a la desaparición de especies vegetales y animales.

El retorno de la conciencia y el deseo de una vida en mayor equilibrio con nuestro medio ambiente requiere el inicio de una última etapa, la "*etapa de respeto*". En esta fase, la ingeniería y la tecnología deben descubrir y promover formas de convivencia sana con nuestro entorno, basadas en la sensibilidad ambiental y la equidad social.

La presente tesis doctoral vincula las etapas históricas previamente descritas y la huella que las acciones antrópicas han dejado sobre el paisaje. Partiendo del *Paisaje Natural*, que define el primer contacto del ser humano con el entorno virgen durante la *etapa de sumisión*, posteriormente se analizará cómo el comportamiento y la relación del ser humano evolucionan durante la *etapa de adaptación*, dando lugar a la construcción de un nuevo entorno, el *Paisaje Construido*. A medida que avanza la *etapa de conquista*, el ser humano ha ido incorporando progresivamente más elementos antrópicos al paisaje, distanciándose cada vez más de los ecosistemas naturales hasta llegar al *Paisaje Destruído*. Finalmente, se explorará la necesidad de desarrollar una mayor conciencia que permita pasar a la *etapa del respeto*, asociada con el concepto de *Paisaje Reconstruido*, como una nueva visión de la interacción entre el ser humano y su entorno.

El estudio y análisis del vínculo entre las cuatro etapas históricas de evolución de la relación entre el ser humano y su entorno, vinculadas con las cuatro denominaciones de paisaje que serán utilizadas en este documento, permitirán a su vez visualizar las alteraciones que sobre el paisaje natural han ocasionado las acciones antrópicas en diferentes ciudades puerto del continente americano.

Para esta tesis doctoral se ha llevado a cabo una investigación sobre la evolución de los paisajes costeros en tres ciudades portuarias del continente americano, las cuales comparten un trasfondo histórico común: la colonización. El objetivo principal de este estudio es determinar si la transformación de dichos paisajes costeros, así como la alteración del paisaje natural de estas ciudades, se encuentra influenciada por los orígenes y las prácticas de sus colonizadores originales. Estos primeros *extranjeros* fueron responsables de introducir cambios significativos en el paisaje natural, afectando de manera considerable los ecosistemas de las zonas analizadas. No obstante, estas intervenciones antrópicas también tuvieron como resultado la conversión de estas ciudades en depositarias de un valioso patrimonio artístico, cultural e histórico.

El análisis comparativo de la evolución de los paisajes costeros en estos tres enclaves permitirá identificar patrones y tendencias que reflejen la influencia de los procesos de colonización en la configuración del paisaje. De esta manera, se sentarán las bases para comprender de manera más profunda la dinámica de transformación de los entornos costeros en el contexto de la expansión colonial en el continente americano, así como en durante el desarrollo particular después de la independencia de dichos territorios.

La investigación se ha dividido entonces, en tres casos de estudio que corresponden a tres ciudades-puerto del continente americano.

El primer caso de estudio abarca la ciudad de **Cartagena de Indias**, *La Heroica*. Localizada en la zona norte de Suramérica, en Colombia, en la bahía homónima (área 82 km²), hizo parte del territorio americano del **Imperio Español** que ocupó estos territorios durante más de 300 años. Por su importancia estratégica, *La Heroica* conformó junto con La Habana y Portobelo el grupo de las denominadas "llaves de las indias"; Cartagena de Indias era la "llave del Caribe", punto clave para el control del comercio y la navegación. La Habana, en Cuba, era la "llave del Golfo" y resguardaba las rutas marítimas hacia el Nuevo Mundo. Y, Portobelo, en Panamá, era "la llave del Istmo" desde donde se vigilaba el acceso entre el Océano Atlántico y el Pacífico. Estos tres puertos conformaron un sistema de defensa y abastecimiento fundamental para el dominio español en América, convirtiéndolos en enclaves vitales durante la época colonial, y motivando a la Corona Española a la construcción masiva de fortificaciones y sistemas de defensa, con el fin de proteger las puertas de acceso hacia sus territorios interiores, además de resguardarles de los continuos ataques por mar, en su mayoría ejecutados por piratas ingleses.



Figura 1.1: Cartagena de Indias, vista desde el noroccidente en 1739.
Fuente: Museo Naval de Madrid. Exposición Blas de Lezo 2013.

El segundo caso de estudio abarca el litoral este de **Río de Janeiro** y la Bahía de Guanabara, en Brasil, quien fuera, además, por el contexto histórico de la península, la capital del **Imperio Portugués** durante 14 años. La ubicación estratégica de Río de Janeiro en la costa sureste del país le confirió una posición privilegiada para el comercio y la defensa del territorio colonial. El acceso directo al Océano Atlántico, la protección natural de la extensa Bahía de Guanabara (área 384 km²), las ventajas defensivas de la topografía accidentada, la centralidad geográfica y la proximidad a áreas productivas, convirtieron a esta ciudad en un enclave fundamental para los intereses portugueses. Desde Río de Janeiro, los colonizadores pudieron controlar eficazmente las rutas marítimas, defender el litoral y administrar la vasta colonia a lo largo de los más de 300 años de dominio portugués en Brasil.

El tercer caso de estudio abarca la línea de costa interior del Lago Pontchartrain (área 1.630 km²) e incluye la línea costera de la ciudad-puerto de **Nueva Orleans**. La zona se ubica al sureste de Luisiana, a 177 km (110 millas) del Golfo de México. En los primeros años Nuevo Orleans hizo parte del distrito administrativo del virreinato de Nueva Francia en América, **Imperio Francés**, en 1763 pasó al dominio colonial español hasta 1800 (**Imperio Español**), cuando fue vendida finalmente a los Estados Unidos de Norteamérica. Durante el período colonial europeo de aproximadamente 100 años, la ciudad mantuvo su importancia estratégica en la desembocadura del río Mississippi, consolidándose como un centro comercial y de transporte clave para el intercambio de productos agrícolas con Europa. La población diversa de Nueva Orleans, compuesta por franceses, españoles, africanos

e indígenas, desarrolló una cultura criolla única, la cual se conservó tras su integración a los Estados Unidos.



Figura 1.2: Pan de Azúcar en el siglo XVI, pintura de T. Taylor.

Fuente: IMAGINA Río De Janeiro, Guía de la Ciudad Maravillosa.

<https://imaginariodejaneiro.com/la-ciudad-de-rio-de-janeiro/historia-de-rio-de-janeiro>



Figura 1.3: Mapa del siglo XVIII asentamiento colonial de Nueva Orleans por F. Saucier, Carte Particulie're du Cours du Fleuve St. Louis, 1749.

Fuente: (deFrance & Kennedy, 2019)

La investigación concluye con una comparación y análisis de los resultados obtenidos en cada caso de estudio para identificar las principales similitudes y diferencias de la evolución del paisaje como fruto de la interacción antrópica sobre el territorio costero. Con esta comparación se pretende dar respuesta a la hipótesis que dio origen a la investigación ¿La evolución del paisaje litoral de una ciudad costera que fue colonia europea entre los siglos XV-XVII está significativamente influenciada por el origen del imperio colonial que llegó a sus costas durante ese período?

Merece la pena resaltar que el origen de las ciudades de los tres casos de estudio está estrechamente vinculado con el imperio del cual fueron colonia. Por lo tanto, dado que las tres ciudades estudiadas fueron parte del Imperio Español, el Imperio Portugués y/o el Imperio Francés, todos los casos de estudio provienen de territorios latinos. Tal y como lo define el Diccionario de la lengua española, en su Edición del Tricentenario, actualización 2023, el término *Latino* hace referencia a los pueblos que hablan lenguas derivadas del latín. Más específicamente, el mismo diccionario de la RAE define *Latinoamericano* como el "Nombre que engloba el conjunto de países del continente americano en los que se hablan lenguas derivadas del latín (español, portugués y francés), en oposición a la América de habla inglesa". Estas definiciones incluyen directamente a las ciudades de Cartagena de Indias y Río de Janeiro. Además, la historia colonial de Nueva Orleans y su lugar en la transformación de Estados Unidos en una potencia imperial del siglo XX, también la convierten en una ciudad latina.

En el desarrollo de la hipótesis, se ha detectado que las variables independientes corresponden al origen del imperio colonial que llegó a la ciudad costera y el estatus de dicha ciudad como colonia europea. Por su parte, la variable dependiente es la evolución en sí misma del paisaje litoral de la ciudad-puerto. Se espera encontrar patrones o tendencias significativos en la evolución del paisaje litoral, los cuales puedan atribuirse, en primera instancia, a las actuaciones antrópicas propiamente dichas, y en segunda instancia, al origen del imperio colonial que se asentó en la ciudad. La verificación de esta hipótesis se ha desarrollado mediante un análisis histórico y geográfico detallado de la evolución del paisaje litoral de la ciudad costera, así como la recopilación de datos cuantitativos sobre las características de dicho paisaje a lo largo del tiempo.

El plan de investigación definido y efectuado para cada caso de estudio, se ha subdividido en cuatro partes fundamentales: en primer lugar, se realiza la contextualización histórica de cada ciudad puerto, desde sus primeros habitantes, su fundación como colonia europea, hasta nuestros tiempos, mezclando conceptos humanísticos, sociológicos, filosóficos, entre otros. En segundo lugar, se realiza el estado del arte técnico donde se estudian y analizan diferentes variables como el clima, la topografía, la batimetría, entre otras, con base en diversas publicaciones científicas. La tercera parte se enfoca en analizar la transformación de la línea litoral a lo largo del tiempo. Para ello, se superponen mapas históricos de la época colonial y mapas actuales. Este ejercicio comparativo permite identificar dos posibles situaciones, la erosión costera caracterizada por la pérdida de terrenos y/o la acreción costera, posiblemente vinculada a la implementación de defensas costeras o rellenos planificados para aumentar la superficie de la zona costera frente al cuerpo de agua. De esta manera, el análisis de la evolución cartográfica de la línea litoral revela los procesos de erosión o acreción que han tenido lugar en el área de estudio. Por último, se aborda el concepto de paisaje afectado por el impacto antrópico analizando los resultados obtenidos. La investigación se apoya en sistemas de información geográfica, como el QGis y similares, para cuantificar el efecto de las obras marítimas sobre el paisaje. La escala de trabajo en los paisajes costeros se ajusta al nivel de detalle que quiera estudiarse, de forma que permita establecer el foco de estudio en los aspectos importantes que generan una mejor comparación entre los diferentes casos de estudio.

El estudio emplea un enfoque comparativo, utilizando mapas cartográficos de períodos históricos diferentes, que permiten identificar y cuantificar los cambios en la línea costera. Los resultados indican que la erosión está asociada, en su mayoría, a la pérdida de manglares y demás vegetación nativa, lo que subraya la necesidad de proteger el medio ambiente y realizar esfuerzos de reconstrucción en las regiones afectadas. Por su parte, la acreción en los casos de estudio seleccionados puede atribuirse a las acciones antrópicas directas como construcción de puertos, puentes u otras infraestructuras, así como, a los rellenos para conformar islas o ampliar territorios continentales hasta generar barrios enteros. Este enfoque metodológico permitirá establecer correlaciones y determinar el grado de influencia que los factores coloniales han ejercido sobre la transformación del entorno costero en el área de estudio.

El valor de esta investigación radica en el análisis detallado del cambio en la línea de costa, empleado como método cuantitativo para visualizar las transformaciones

del paisaje costero provocadas por la acción humana a lo largo del tiempo. Se busca también sensibilizar a los lectores e investigadores que tengan acceso a este estudio, orientándolos hacia la sostenibilidad y la reconstrucción de estos entornos litorales. Asimismo, este trabajo busca responder con bases científicas si la actividad antrópica tiene un impacto directo en la degradación del paisaje y los ecosistemas costeros. El examen minucioso de los patrones de cambio en la línea de costa permitirá establecer correlaciones y determinar el grado de influencia de los factores humanos en la transformación de estos frágiles entornos. De este modo, los hallazgos de la investigación podrán servir como fundamento técnico y empírico para informar la toma de decisiones y el desarrollo de políticas orientadas a la preservación y restauración de los paisajes costeros, fomentando así un enfoque más sostenible en la gestión de estos valiosos ecosistemas.

2. Estado del Arte y Casos de Estudio

Antes de desarrollar cada uno de los casos de estudio es imprescindible ahondar en el concepto de paisaje, la contextualización histórica del término y la interacción directa e indirecta con las cuatro etapas de percepción del medio físico utilizadas durante el desarrollo de esta hipótesis.

2.1. Estado del Arte del Paisaje

Históricamente el paisaje como representación visual de un lugar determinado nace en la primera mitad del siglo XV, en pleno Renacimiento, en ciudades importantes para el desarrollo artístico del norte de Europa como Gante y Brujas, mientras que, paralelamente, Filippo Brunelleschi en Florencia, Italia, concibe las técnicas de perspectiva lineal que se convierten en una especie de método de la pintura del paisaje italiana. Al principio, se trata de escenarios de fondo que sirven para acompañar a la imagen de la Virgen o a un santo y que representan un lugar real, aunque la escena en él sea evidentemente ficticia. Con el tiempo, estos escenarios marginales se convierten en el tema central de la pintura y los personajes se hacen más pequeños y anónimos. Nace, así, un tipo de *pittura* ‘pintura’, cuyo tema es la representación de un paese ‘país’. En las diferentes lenguas romances, país ha sido definido como la tierra donde uno nace y a la cual está ligado afectivamente. Es una tierra habitada y cultivada. Para el geógrafo francés Roger Brunet, paisaje es «lo que se ve del país» (Fernández Christlieb, 2014). Mientras paese y *pittura* se emplean de manera constante en el siglo XV, el término italiano *paesaggio* ‘paisaje’ no aparecerá sino hasta el siglo XVI, y hasta donde se sabe, el término paisaje aparece en lengua española en 1708 (Corominas, 1983).

Las definiciones de paisaje son diversas, para lo cual iniciaremos con la otorgada por el Convenio Europeo del Paisaje, que en el año 2000 lo establece como “cualquier parte del territorio tal y como lo percibe la población, cuyo carácter sea el resultado de la acción y la interacción de factores naturales y/humanos”, así las cosas, podríamos pensar que, antes de la presencia del ser humano no existía la noción de paisaje como tal, pues la misma definición relaciona la percepción del uno con la existencia del otro, lo que lo sitúa como un concepto antropocéntrico.

Corroborar lo expuesto (del Campo Francés, 1951), quien expresa que la palabra paisaje no es antigua y su uso empezó en pintura, precisamente cuando la naturaleza se convirtió en tema fundamental de los cuadros. Antes, la naturaleza era el fondo de las figuras, y todavía no era paisaje; cuando se convierte en tal, las figuras desaparecen o son complemento de la naturaleza pintada. Y se cuestiona, “¿Quiere decir esto que el paisaje es tan moderno como su nombre?”. Entonces, concluye, *considerando el paisaje como fenómeno psicológico, parecen delimitarse, en principio, sus contornos en la Naturaleza y en su contemplación. La naturaleza sola no es paisaje, con el hombre, situado en ella para vivir sobre ella exclusivamente, tampoco, y no cabe duda que la Naturaleza preocupó al hombre y la Ciencia fue apareciendo como conocimiento y producto de la observación, y cuando el hombre contempló, sintió. Apareciendo en él el sentimiento de la Naturaleza.*

Precisamente, para (Contreras Delgado, 2005) el concepto paisaje ha evolucionado significativamente a lo largo del tiempo, transitando de un término pictórico a un concepto académico. Además, menciona que inicialmente, el paisaje se entendía como un espacio controlado o delimitado, pero que posteriormente se asoció a la representación visual. En el siglo XX el paisaje se convirtió en un objeto de estudio relevante, superando enfoques limitados a lo visible e inmediato. Actualmente, se concibe como un fenómeno complejo, que incluye aspectos temporales, subjetivos y simbólicos que requiere un enfoque interdisciplinario y el desarrollo de nuevas teorías y metodologías. Conceptualización que coincide con (Gómez Zotano, *et al.*, 2010) quien asegura que, dada su evolución, el concepto paisaje ha pasado de ser visto como un escenario simbólico o reservorio de esencias patrióticas, a entenderse como un marco vital y un garante de la democracia, y que, a su vez, la definición de El Convenio Europeo del Paisaje (CEP) implica una doble ampliación del concepto, tanto espacial como temporal, que obliga a renovar los presupuestos teóricos y metodológicos del análisis y la praxis del paisaje, y, por tanto, el paisaje se concibe ahora como un sistema relacional, resultado de la interacción entre la naturaleza y la sociedad, que debe ser abordado de manera integral.

Se entiende, entonces, que el término *paisaje* introducido en el lenguaje durante los últimos 300 años, es fundamentalmente la percepción del *lugar*, y que este mismo puede, o no, haber sido alterado por el ser humano, así como, que su conceptualización ha evolucionado y continúa evolucionando inagotablemente.

Parece oportuno para el desarrollo de esta tesis, continuar con el abordaje de las clasificaciones que sobre paisaje se han elaborado. Por ejemplo, (del Campo

Francés, 1951), lo clasifica según la intervención humana en la naturaleza, tal y como se muestra en el esquema de la figura 2.1, partiendo de aquel paisaje carente de intervención al que ha denominado *Paisaje Natural*.

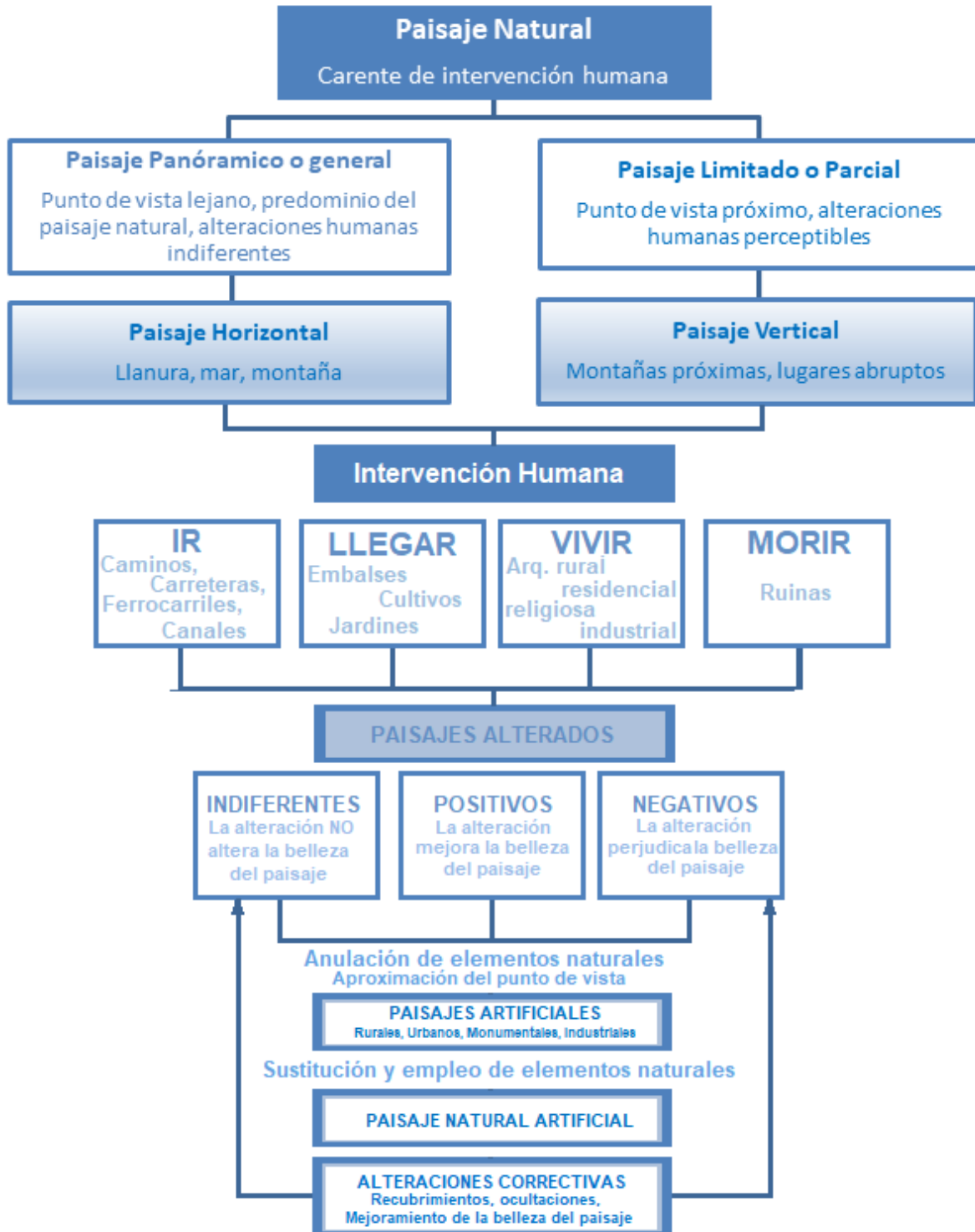


Figura 2.1: Clasificación de los Paisajes según la Intervención Humana.
Fuente: (del Campo Francés, 1951)

Existen, además, diversas clasificaciones del paisaje que varía según el foco con que se estudien, por ejemplo, el paisaje geográfico o espacio geográfico, que según (Contreras Delgado, 2005), se define como una porción delimitada de territorio que puede ser abarcada en su conjunto por la mirada del observador, incluyendo tanto elementos naturales como construcciones y actividades humanas que interactúan y se influyen mutuamente. El paisaje geográfico va más allá de una mera representación visual, ya que refleja la compleja relación entre el ser humano y su entorno, capturando aspectos culturales, sociales, históricos y simbólicos que dan forma y significado a ese espacio. Así, el paisaje se convierte en una expresión tangible de la interacción entre la naturaleza y la acción humana a lo largo del tiempo, siendo objeto de estudio fundamental para comprender la dinámica y la identidad de un lugar determinado. El paisaje geográfico constituye el objeto de estudio esencial de la geografía, pues a través de su comprensión puede organizarse la superficie terrestre de acuerdo a criterios discernibles. Esta es la razón por la cual el “paisaje” no significa lo mismo para un geógrafo, que, para un pintor, un topógrafo o un turista (Igual, 1965).

El mismo (Igual, 1965) establece otra clasificación para los paisajes; el paisaje natural que integra elementos abióticos como la atmósfera, hidrosfera y litosfera, regidos por leyes inorgánicas (desierto salino, tundra). El paisaje inorgánico que integra solo elementos abióticos (desierto de hielo). El paisaje orgánico que integra elementos abióticos y bióticos (biosfera), regidos por leyes inorgánicas y orgánicas (selva virgen). Y el paisaje cultural que integra la antroposfera (actividad humana) junto a los elementos abióticos y bióticos, con una mezcla de leyes inorgánicas, orgánicas y espirituales (agrícolas, industriales).

Para (Pérez-Chacón E., 2005) la clasificación del paisaje se puede realizar atendiendo a diversos criterios. En primer lugar, por el geo-sistema según su estructura (natural o antrópico) y su dinámica (estable, en progresión o regresión). Asimismo, el paisaje puede clasificarse según su componente escalar, distinguiendo entre diferentes unidades como zona, dominio, geocora, etc. Desde una perspectiva histórica, se diferencian paisajes pre-cuaternarios, cuaternarios e históricos. Por último, el paisaje también puede clasificarse en función de la dominancia de sus elementos estructurales, ya sean abióticos, bióticos o antrópicos. Esta taxonomía permite analizar de forma integrada la complejidad del paisaje y sus dinámicas de transformación.

También existe la clasificación de los paisajes desde la perspectiva artística, ya sea por el estilo de dibujo: paisaje realista que representa el paisaje tal como el artista lo observa, buscando una comparación fiel con la realidad. El paisaje impresionista que representa la realidad a través de la interpretación del artista, capturando el instante. Y el paisaje abstracto en el cual el artista tiene libertad de expresar su creatividad sin límites, alterando o creando escenarios imaginarios. O bien, por los elementos que lo componen donde se encuentran el paisaje natural con protagonismo del escenario natural (bosques, selvas y desiertos). El paisaje urbano o de ciudad enfocado en los elementos de las ciudades (edificios, personas y luces). El paisaje rural que muestra escenarios de actividad agrícola (cultivos y viviendas rústicas). El paisaje onírico que combina escenarios imaginarios o de sueños con elementos de la realidad. El paisaje fluvial donde se retratan cuerpos de agua (ríos, lagos y cataratas). El paisaje marino-costero que da protagonismo a la vida marina (océanos y playas). El paisaje de desierto, caracterizado por grandes masas de arena y vegetación escasa. El paisaje de sabana y llanos con un gran horizonte con vegetación rala y algunos árboles. El paisaje costumbrista, enfocado en los personajes que materializan una costumbre o tradición. Y los paisajes etéreos, pintados desde una vista privilegiada, como desde el aire (Crehana , 2024).

Por lo expuesto, se torna muy importante definir con claridad la clasificación de paisaje que se utilizará en este documento, y su relación con las cuatro etapas de la percepción del entorno físico: paisaje natural, construido, destruido y reconstruido. Las tres primeras definiciones han sido discutidas como parte de la tesis doctoral de (Martín-Antón, 2018). La cuarta definición se ha incorporado durante el segundo caso de estudio por (González Rodríguez, *et al.*, 2024):

Paisaje natural: consiste en la defensa de lugares excepcionales, dentro de una concepción y dimensión objetiva. En ciertas fuentes bibliográficas responde al concepto de “protegido”.

Paisaje construido: obras combinadas de la naturaleza y el *ser humano* que ilustran la evolución del ambiente natural ante fuerzas sociales y culturales. En ciertas fuentes bibliográficas responde al concepto de “cultural”.

Paisaje destruido: consiste en la desaparición del espacio natural y territorial, de la ciudad y la naturaleza en todos sus aspectos, desde social al ambiental, desde sostenible al de comunicaciones, “abandonado”.

Paisaje reconstruido: consiste en rehabilitar, dismantelar, devolver el «lugar» a su escenario y horizonte excepcional y objetivo, “reconquistado”.

El reporte “Agua, Cultura y Sociedad” también hace mención a las definiciones antes descritas, aunque las asocia en dos clasificaciones, cuando indica: “Cada uno de los impactos ambientales causados por las presas (obras que involucran agua, en general), sobre el ecosistema, como ocurre con cada uno de los individuos de todas las especies de la fauna que lo compone, produce su correspondiente “huella” sobre el paisaje. Esta “huella” es diferente para cada uno de ellos, pero todas son perfectamente reconocibles e identificables. Así ha evolucionado, durante millones de años, el “paisaje natural” modificado constantemente por las “huellas” de su biocenosis. Ahora, desde hace unos siglos, este “paisaje natural” está evolucionando hacia un “paisaje humanizado”, perdiendo su información acumulada en millones de años. El paisaje, en cada instante, es una foto fija de este proceso continuo, variado y en equilibrio dinámico (Hernández Fernández & Hernández Alonso, 2013). Entonces, el *paisaje natural* comparte el significado expuesto, mientras que el paisaje construido, destruido y reconstruido conforman un único concepto, *paisaje humanizado*.

Las figuras 2.2, 2.3 y 2.4 muestran fotografías modernas que permiten evidenciar las tres primeras clasificaciones de paisaje, localizadas en *Cartagena de Indias*.



Figura 2.2: Paisaje natural, Isla Tierra Bomba año 2000.

Fuente: <http://www.playalindacartagena.com>



Figura 2.3: Paisaje construido, Fuerte de San Fernando de Bocachica, 2000.
Fuente: <http://www.cartagena-indias.com>



Figura 2.4: Paisaje destruido, vista aérea Bocagrande y El Laguito, 2018.
Fuente: <http://pedrazaproducciones.com>

Por su parte, las figuras 2.5 y 2.6 ilustran la evolución del paisaje percibida por el artista gráfico Carlos Gustavo Nunes Pereira (GUTA), que permiten evidenciar las diferentes clasificaciones de paisaje en la playa de Copacabana, en *Río de Janeiro*.



Figura 2.5: Representación Playa Copacabana por GUTA años 1893 y 1927.
Fuente: Base de datos del Ayuntamiento e IPP (Instituto Pereira Passos)



Figura 2.6: Representación Playa Copacabana por GUTA años 1956 y 2012.
Fuente: Base de datos del Ayuntamiento e IPP (Instituto Pereira Passos)

El paisaje natural es el paisaje original. El paisaje natural se transforma por el arte de construir, por la relación de la obra con la naturaleza, creando un paisaje nuevo emocional, viviente y, sobre todo, trascendente, el paisaje construido. Cualquier otra acción humana que altera, ataca y agrede al medio físico se enmarca en el concepto de paisaje destruido (Martín-Antón, 2018). El siglo XXI todavía tiene el reto del paisaje reconstruido.

Esta tesis se centra en la evolución del paisaje dentro del territorio conformado por la frontera entre el continente y el mar, el estuario o el océano. La perspectiva de esta frontera está fuertemente marcada por el lugar en el que se ubica el observador y, por tanto, la percepción de la "tierra firme" desde el mar conduce al concepto de "costa", mientras que la percepción del mar desde tierra firme conduce al concepto de "litoral" (Diez, 2001). En este territorio frontera se fusionan el medio marino y el terrestre, constituyendo un medio único y diferenciado.

Según el mismo autor, (Diez, 2001), el paisaje litoral se caracteriza por su naturaleza bifronte, bilateral y bifásica. Bifronte, la percepción del "frente litoral" desde tierra y del "frente costero" desde el mar recoge en sí misma la doble percepción de dos frentes cuya experiencia es radicalmente contrapuesta. Bilateral, permite referenciar con determinación el "lado del mar" y el "lado de tierra". Bifásica, la interfase entre ambos medios, le confieren una gran complejidad y riqueza; coexisten la tierra y el mar, el paisaje terrestre y el marino. El paisaje litoral es transformable tanto por procesos naturales como por la acción humana, lo que le otorga un enorme potencial de cambio a lo largo del tiempo. Esta versatilidad y capacidad de evolución son rasgos definitorios del paisaje litoral como categoría paisajística.

En las siguientes secciones se realizará un análisis detallado de la evolución del paisaje en tres ciudades portuarias seleccionadas. Partiremos del paisaje original que caracterizaba estos territorios, para luego examinar cómo el paisaje ha sido transformado por la acción humana, ya sea a través de la mejora o la destrucción del paisaje. Los resultados se evaluarán en términos de acreción (crecimiento, tierras ganadas al mar) o erosión (pérdida) del paisaje natural, y por tanto será necesario, en primera instancia, definir estos términos.

2.2. Dialéctica Ambiental, Erosión y Acreción Costera

2.2.1. Dialéctica Ambiental

Para definir *Dialéctica Ambiental* se tendrán en consideración tanto los conceptos *Costa* y *Litoral* definidos por (Diez, 2001), así como la capacidad de transformación debido a la naturaleza intrínseca de la *zona costera* como frontera simbólica y dinámica sujeta a oscilaciones diversas entre lo seco y lo húmedo, la tierra firme y el mar azul.

La dialéctica ambiental que se establece en la zona costera, especialmente en el borde litoral y su entorno, se caracteriza por la interacción dinámica entre dos fuerzas principales:

Fluidodinámica: los diferentes componentes del clima, tanto aéreos como marinos, que actúan de manera dinámica sobre la costa.

Morfodinámica: la respuesta de la corteza territorial, es decir, los cambios en la estructura y morfología de la costa que se generan como consecuencia de esa acción climática.

Este proceso interactivo entre la fluidodinámica y la morfodinámica busca alcanzar un equilibrio dinámico, ya que la naturaleza cambiante del clima impide que dicho equilibrio sea estático. La fluidodinámica (viento y mar) actúa sobre los bordes costeros, produciendo cambios en su morfología (respuesta). A su vez, esta nueva morfología de las zonas costeras modifica las acciones de la fluidodinámica marina, y el ciclo continúa en un proceso interactivo constante (Diez, 1999).

Entonces, la dialéctica ambiental en el *litoral* se caracteriza por esta dinámica de acción y respuesta entre los factores fluidodinámicos y morfodinámicos, que se encaminan hacia un equilibrio que solo puede ser dinámico debido a la variabilidad climática.

La mayoría de las costas son naturalmente dinámicas, lo que significa que están perpetuamente inmersas en la dialéctica ambiental definida, como se ha mencionado, por la interacción dinámica entre el océano y el continente. En esta interacción la morfología del continente se modifica presentándose los fenómenos de erosión o acreción. Durante la fluidodinámica el agua que retrocede transporta material del continente, sobre el que actuará posteriormente en la línea de costa, depositando el material transportado para que sea retirado de nuevo y se reinicie infinitamente este proceso. La dialéctica ambiental depende directamente de la

naturaleza y la morfología inicial de las zonas costeras y sus bordes. Para sus efectos es importante distinguir entre costas estructurales y sedimentarias; las primeras son acantilados, arrecifes y llanuras, mientras que la segunda categoría está formada por playas de diferentes formas en función de la morfología estructural previa (González Rodríguez, *et al.*, 2021).

El resultado final de la dialéctica ambiental es pues el equilibrio dinámico, en el que las pérdidas y la recuperación de la costa se efectúa en un ciclo determinado por el clima marítimo y que puede ser diurno, mensual, anual, hasta decadal, de ahí que muchas pérdidas o aumentos de sedimentos en el borde costero solo puedan considerarse como erosiones o depósitos cuando perduren más allá de los ciclos climáticos manifestados en esas costas.

El tiempo de permanencia de los procesos morfodinámicos desde su configuración puede conducir a evoluciones tendentes a regularizar las franjas costeras. Esto da lugar a una gran variedad de paisajes litorales como las marismas, manglares, estuarios, deltas, dunas, etc., que implica una gran variabilidad espacial y temporal de los paisajes litorales, que supone un enorme potencial de transformación, natural o inducida.

2.2.2. Erosión Costera

El resultado de la dialéctica ambiental es, por tanto, el equilibrio dinámico en el que las pérdidas y la recuperación de la costa se realizan en un ciclo determinado por el clima marítimo. Las pérdidas o incrementos de sedimentos en el borde costero sólo pueden considerarse erosiones o depósitos, cuando perduran más allá de los ciclos climáticos manifestados en esas costas, por tanto, las pérdidas costeras que no se recuperan en una década se definen comúnmente como pérdidas permanentes y muestran un desequilibrio costero, erosión.

(Yin-can, 2017) define la erosión costera como el resultado de las actividades humanas y de los cambios ambientales naturales, que hacen que la acción dinámica costera (oleaje, corriente, viento) pierda equilibrio en el proceso costero. La pérdida a largo plazo de sedimentos de la zona costera provoca el proceso de destrucción de la línea de costa y la erosión de las playas.

Por su parte, para (Mazda, *et al.*, 2002), la progresión de la erosión costera depende de dos condiciones necesarias. En primer lugar, el flujo de la corriente debe ser lo suficientemente fuerte como para desplazar los sedimentos del fondo y, en segundo lugar, el aporte y la desaparición de sedimentos del fondo debidos al flujo no están

equilibrados entre sí. Por lo tanto, para evitar una mayor erosión en determinadas zonas, es necesario analizar el mecanismo de las dos condiciones anteriores.

2.2.3. Acreción Costera

La acreción costera es el resultado de la acumulación de sedimentos en un lugar específico de la costa, donde permanecen a lo largo del tiempo, dando lugar a un cambio en la línea de costa del continente al océano. La deposición de sedimentos puede generarse de forma natural, por ejemplo, por el transporte de sedimentos a lo largo de la línea de costa, o por medios antropogénicos. Con respecto a esto último, hay varias formas en que puede ocurrir. Un método es la deposición directa de arena para aumentar la anchura de la playa. Para ello se estudian las características de la arena que se va a depositar. Otro método es mediante la construcción de puertos o islas para diferentes fines.

Precisamente, (Martín-Antón , *et al.*, 2016) muestra que la construcción de islas artificiales (recuperación de tierras) es mucho más amplia de lo previsto y se ha desarrollado mucho más en China, Japón, Corea y el Golfo Pérsico que en el resto del mundo. Y que la recuperación de tierras en los puertos es más importante que en las zonas residenciales, en términos de superficie total.

Así mismo, con el aumento de la actividad náutica con fines comerciales o militares, surgen los primeros puertos marítimos como lugares estratégicos para realizar las maniobras de carga y descarga de mercancías, así como para almacenar y distribuir dichas mercancías, satisfaciendo intereses económicos y fiscales tanto públicos como privados. Este desarrollo, como consecuencia del crecimiento de la actividad y la influencia de los ámbitos portuarios, acerca definitivamente la ciudad al mar, generando que los núcleos de población que históricamente se localizaron cerca de la costa, pero alejados de los riesgos propios de la zona, reduzcan la separación y se conviertan en una sola entidad (García Navarro, 2002)

2.3. Cartagena de Indias, Colombia

Localizada en la zona norte de Suramérica, en Colombia, y marcada por la fuerte presencia de una bahía de 82 km² de área y un borde de agua de más de 75 km, que abarcan el mar (línea de costa), la bahía, la ciénaga de la Virgen, los caños y lagos, Cartagena de Indias tuvo su origen y evolución como una ciudad-puerto de gran importancia para el desarrollo de la historia, desde antes de la llegada de los españoles al continente hasta nuestros tiempos.

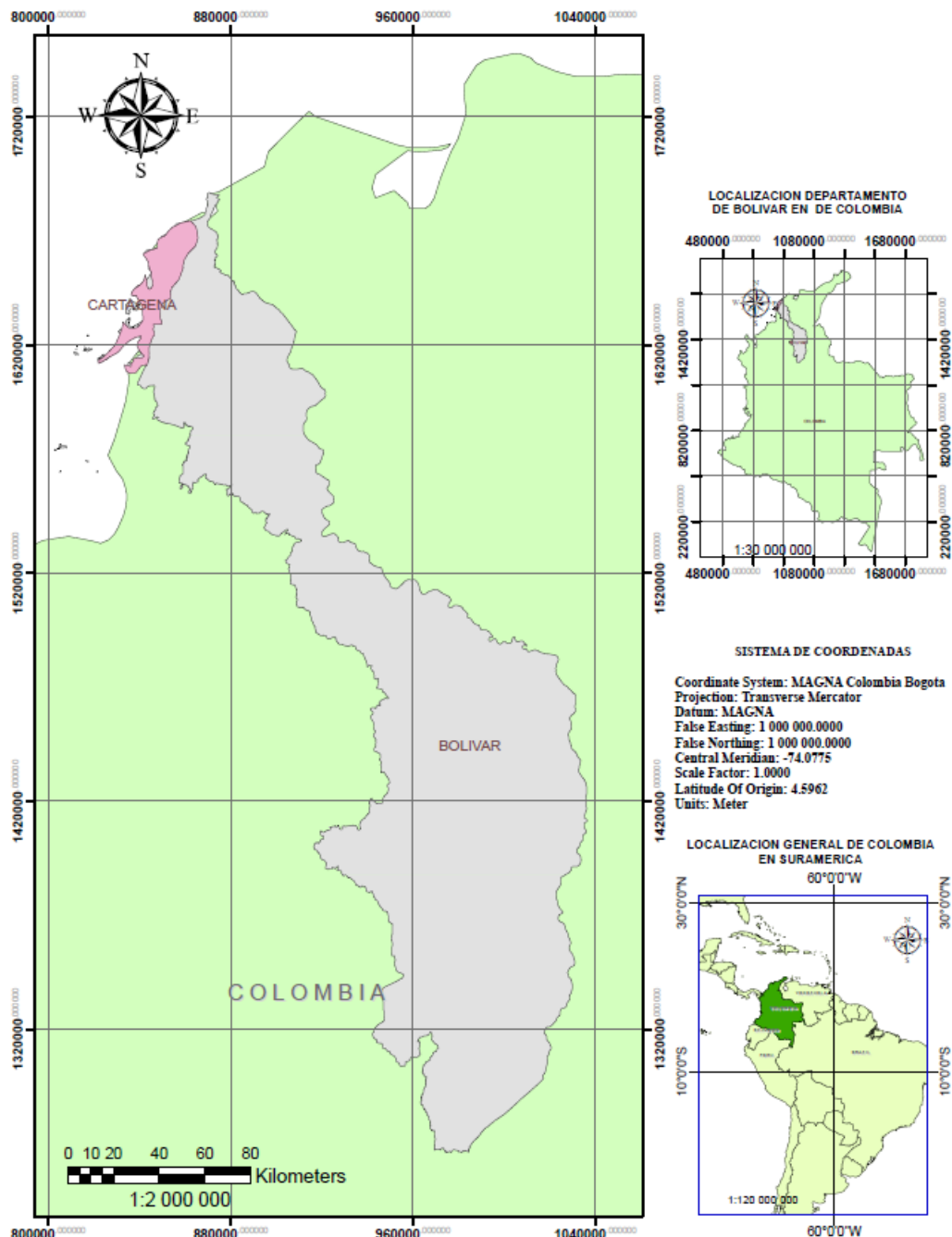


Figura 2.7: Localización de Cartagena de Indias, Colombia.

Fuente: Elaboración propia.

Estudios arqueológicos indican que la cultura Puerto Hormiga habitaba la zona alrededor del 4000 a.C., seguida por la cultura Monsú hacia el 3000 a.C. Posteriormente, en el 1500, diferentes tribus de las familias lingüísticas Karib, Arawak y Malibú se asentaron en las islas de la zona. En 1533, el madrileño Pedro de Heredia desembarcó en Kalamari y fundó la ciudad de Cartagena de Indias, cuyo nombre hace referencia a la Cartagena española.

Durante casi trescientos años la cartografía de Cartagena de Indias referencia su puerto, sus murallas y sus castillos. Y por lo mismo, a partir del siglo XVII, los planos detallados, que delinean no sólo ingenieros y prácticos de la Corona sino también codiciosos enemigos de España fueron cada vez más abundantes (Segovia, 2001). No se conocen referencias gráficas de su aspecto durante los primeros 37 años de la ciudad. Se sabe que era una ciudad construida con materiales como la palma y el bahareque, incluyendo la propia iglesia catedral, ya que la piedra era un material lejano y costoso. La ciudad creció, como es común en las fundaciones indianas, alrededor de dos plazas principales: la plaza Mayor o de aparato, y la plaza del Mar, también conocida como plaza Real o del comercio (Pérgolis, 1998). Tras un incendio en 1552, Cartagena de Indias se reconstruyó con materiales pobres, prohibiéndose acercar fuego a paredes y techos por seguridad.

El primer registro cartográfico conocido de Cartagena de Indias, realizado en 1570, muestra la importancia estratégica de su bahía como puerto de grandes navíos, la distribución de 400 casas en la isla de Kalamari, la ubicación de la catedral, cañones y el fuerte del Boquerón, así como otras características topográficas relevantes, incluyendo la Popa de la Galera, Getsemaní, el matadero y las ciénagas. Además, se identifica la aldea de Turbaco, que sirvió como refugio durante los asaltos de piratas en 1544 y 1560.



Figura 2.8: Primer plano conocido de Cartagena de Indias. 1570.

Fuente: Credencial Historia No. 143

En el contexto de la organización del comercio con las Indias Americanas durante el siglo XVI, la Corona española inició la construcción de defensas en sus puertos más importantes, destacando la Bahía de Cartagena de Indias, después de La Habana y el Istmo de Panamá, los cuales eran continuamente asediados por corsarios y piratas franco-ingleses. Asimismo, surgió el proyecto del Canal del Dique en 1650, con el fin de conectar la ciudad con el río Magdalena.

Atendiendo a las recomendaciones militares para la protección de la ciudad, la Corona ordenó que las edificaciones se alejaran al menos quinientos pasos de la muralla, aunque el cumplimiento de esta orden fue parcial, permitiendo la creación de una calle de ronda, hoy conocida como calle del Pedregal. La construcción de las defensas de la ciudad-puerto se inició en 1614 con la cantería del baluarte de Santo Domingo, culminando en 1635 con la finalización de las murallas, bajo la dirección de los ingenieros militares Cristóbal de Roda y Francisco de Murcia. Posteriormente, estas fortificaciones fueron modificadas, reconstruidas, reforzadas y reestructuradas por los ingenieros militares Juan de Herrera y Sotomayor (1703-1735) y Antonio de Arévalo (1742-1798).

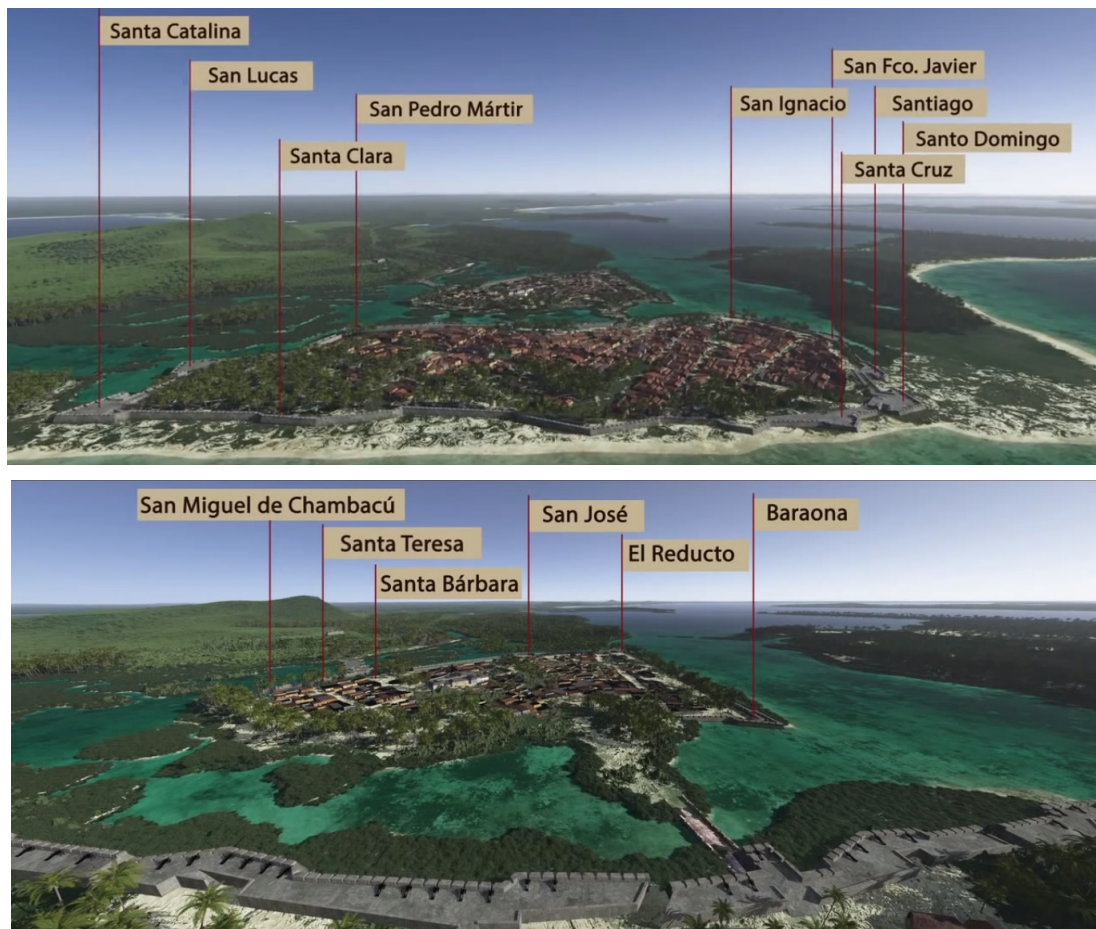


Figura 2.9: Defensas de Cartagena de Indias, vista noroccidente en 1739.
Fuente: Museo Naval de Madrid. Exposición Blas de Lezo 2013.

Del siglo XVII, subsisten en Cartagena de Indias los restos del fuerte de Santa Cruz de Punta Judío o Castillo Grande y el fuerte de Manzanillo en la Punta de su isla. En Bocachica, se encontraba el castillo de San Luis, abandonado en la segunda mitad del siglo XVIII tras los ataques de Vernon en 1741, siendo reemplazado por un sistema defensivo compuesto por el castillo de San Fernando, el fuerte-batería de San José, la batería de Santa Bárbara y el fuerte del Ángel San Rafael. Además, en la isla de Manga se construyó el fuerte de San Sebastián del Pastelillo en 1743, sustituyendo a la antigua batería del Boquerón. Finalmente, destaca el gran castillo de San Felipe de Barajas, la reina de las fortificaciones, que protege a la ciudad amurallada (Segovia, 2001).

Las fortificaciones de Cartagena de indias y de su bahía, multiplicadas, transformadas y recuperadas a lo largo de los años, se han convertido en la propia esencia de la ciudad y constituyen el principal rasgo de su fuerte carácter (Aguiló, 1999). En la figura 5 a continuación se observa el orden cronológico en que se construyeron las fortificaciones en Cartagena de Indias y su bahía.

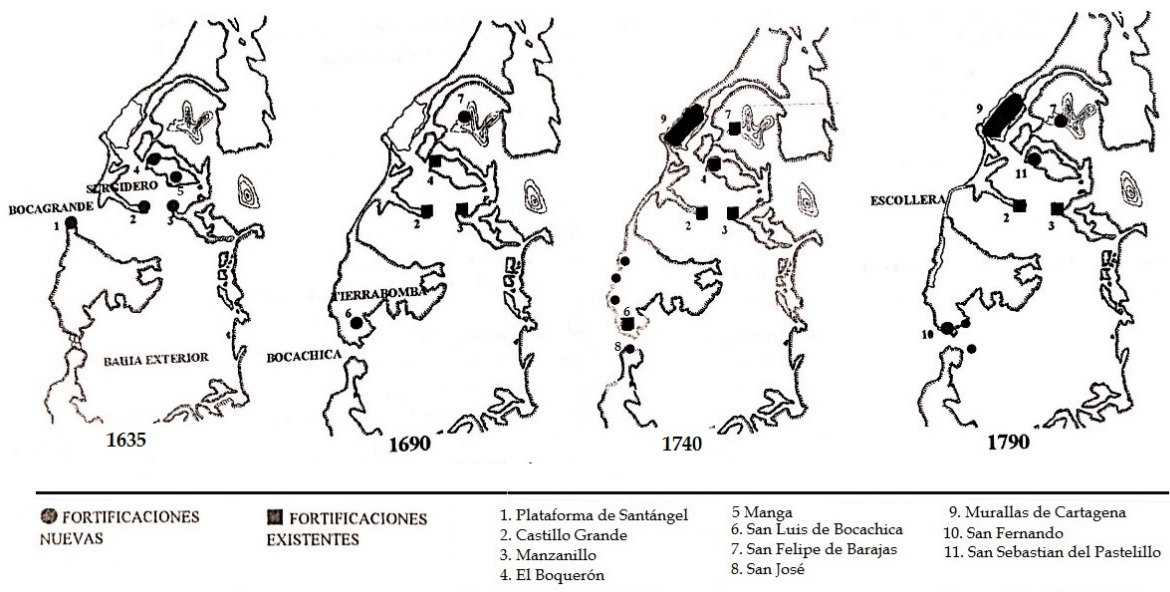


Figura 2.10: Fortificaciones sucesivas de la bahía de Cartagena de Indias.
Fuente: El Puerto, un Lugar de Refugio. Pág. 130. (Aguiló, 1999).

En 1650, se concretó el primer tramo del proyecto del Canal del Dique, con dimensiones aproximadas de 3.000 varas de largo y un ancho variable de 4 a 8 varas, que conectaba el río Magdalena con la importante ciudad-puerto. En el siglo XVIII, se llevaron a cabo importantes obras de infraestructura en la bahía de

Cartagena, como la ampliación del muelle de la Contaduría en 1732, la construcción de la escollera de la marina a lo largo de la muralla en 1765 y el espigón de la Tenaza en 1779-1780, así como la escollera de Bocagrande en 1771.

Después de la guerra de independencia de las indias en 1810, el Estado Libre de Cartagena recibió el contraataque del general español Pablo Morillo, en 1815, la ciudad fue entonces defendida por rebeldes hasta perder la vida, recibiendo por ello el estandarte de “Ciudad Heroica”, no obstante, la ciudad evacuada, en su mayoría por mar, permaneció bajo el poderío español hasta 1821. El 10 de octubre de ese año los españoles fueron derrotados y la última urbe en ser liberada quedó convertida en una ciudad deshabitada.

Durante el siglo XIX, se llevó a cabo un segundo intento de construcción del Canal del Dique, entre 1844 y 1850, a cargo del ingeniero estadounidense George M. Totten. Este nuevo canal de 15 kilómetros de longitud, con esclusas de madera en cada extremo, buscaba controlar el caudal y la entrada de sedimentos a las ciénagas. Sin embargo, las esclusas fueron destruidas por la primera gran creciente del río Magdalena en 1852, dejando el canal en servicio por tan solo dos años (Mogollón Vélez, 2012).

Tras la década de 1880, Cartagena de Indias comenzó a recuperarse lentamente de la crisis, recibiendo comunidades de inmigrantes que huían de la Gran Depresión. La llegada de buques de acero y vapor, y la necesidad de mejorar la conectividad, motivaron la recuperación del Canal del Dique y la construcción de un nuevo muelle marítimo, reabriendo la navegabilidad por el río Magdalena en 1881. En 1894, la llegada del ferrocarril de Calamar marcó el inicio de la modernización de la ciudad y las construcciones fuera de las murallas. En 1904, se construyó el nuevo mercado en el área del baluarte de Barahona en Getsemaní. Con el objetivo de retomar el pasado portuario, Cartagena demolió parte de la muralla y finalizó la desecación del Caño San Anastasio. En 1909, se otorgó un nuevo uso de suelo a la península de Icacos como parque industrial. Los cambios en el uso del suelo provocaron un desplazamiento masivo de la población hacia la franja costera externa a la muralla. Finalmente, entre 1934 y 1984, se realizaron diversas intervenciones en el Canal del Dique, con el objetivo de eliminar curvas, reducir su longitud y ampliar el ancho de navegación, lo que ha incrementado significativamente el caudal desviado del río Magdalena y el transporte de sedimentos.

En 1956 el gobernador del departamento de Bolívar invitó al ingeniero español Ramón Iribarren para que realizará un estudio de la defensa costera de Cartagena de Indias. Durante el viaje, Iribarren calculó que el canal de Bocagrande no se cerró por los botes embarrancados sino por colmatación natural. Según sus cálculos, el caudal afluyente de arena había llegado a su máximo en 1640, descendiendo después, por lo que poco a poco la franja del cierre fue disminuyendo, motivo por el que bastaron unas ligeras obras para que se produjera su apertura. Como solución para el problema, Iribarren propuso la construcción de un espigón en el tramo de Bocagrande que mejoraría la situación de Playa Grande, vital para el desarrollo turístico de la zona. En una segunda etapa establecía la ejecución de otros dos espigones en los tramos de Santo Domingo y la Tenaza. La idea básica consistía en levantar las estructuras en orden contrario a la marcha de las arenas para detener el transporte de las mismas de norte a sur y así lograr una línea estable de playa (Romero Muñoz, 2000).

En los últimos tiempos se han construido varias obras que abarcan la construcción de puertos petroleros, deportivos, muelles y la misma modificación del Canal del Dique, que han transformado el comportamiento de la bahía y sus zonas aledañas. El 30 de noviembre de 2010, en medio de un periodo de lluvias excepcionales por el fenómeno de “La Niña”, se rompió uno de los diques carreteables del Canal del Dique, causando la inundación en la mitad sur del departamento del Atlántico.

2.3.1. Condiciones climáticas, físicas y geomorfológicas

Las temperaturas máximas históricas en Cartagena fueron 40°C en 1965 y 39,8°C en 2007, con períodos secos prolongados y lluvias más intensas. Los promedios anuales máximos de 28,5°C ocurrieron en 1943 y 1952, mientras que los mínimos han aumentado desde los 80s, entre 21,5-23°C. La temperatura superficial del mar en el Caribe oscila entre 25-28°C, con un promedio multianual de 27,9°C en Cartagena.

El régimen de precipitación en Cartagena presenta dos épocas principales y una de transición. La época húmeda de mayo a noviembre registra 100 mm mensuales, mientras la seca es de diciembre a abril. La época de transición (junio-julio) tiene lluvias esporádicas y altas temperaturas. Los máximos mensuales fueron 613 mm en octubre 2007 y 580,9 mm en noviembre 2010, con promedios cercanos a 220 mm y 138,9 mm, respectivamente. En los meses de transición, el promedio es 100 mm, con un máximo de 382,5 mm en julio 2010 (EPA, 2018).

El aumento del nivel del mar es una grave preocupación en las regiones costeras de Colombia. Según el proyecto C3A de CEPAL 2011, el peor escenario proyecta un ascenso global de 40 cm para 2100 en Cartagena de Indias (INVEMAR, 2017).

ÁREA	2040	+ -	2070	+ -	2100	+ -
LA GUAJIRA	75	4.5	165	12.10	255	17.63
MAGDALENA	68	4.5	164	12.30	260	17.90
ATLANTICO	74	4.5	164	11.90	254	17.37
BOLIVAR	74	4.4	162	12.20	250	17.73
SUCRE	73	4.4	163	12.10	253	17.60
CORDOBA	75	4.5	161	12.30	247	17.90
ANTIOQUIA	46	2.6	72	3.30	98	5.27
CHOCÓ (Pac)	23	1.9	61	2.30	99	3.70
VALLE DEL CAUCA	18	1.5	43	2.30	68	3.57
CAUCA	17	1.5	41	2.20	65	3.43
NARIÑO	16	1.5	38	2.20	60	3.43

Figura 2.11: Estimación del ascenso del nivel del mar en Colombia (en mm).
Fuente: Análisis de vulnerabilidad marino-costera e insular, Invemar, 2017.

Cartagena de Indias está localizada en las serranías de San Jacinto, Turbaco-Luruaco-Tubará y zonas con morfología suave de amplias planicies interrumpidas por zonas de colinas o relieves ondulados, limitados al occidente por la línea costera. La geomorfología litoral la caracterizan principalmente sus formas depositarias, entre las cuales se destacan las siguientes:

- **Depósitos Orgánicos (Do):** Se presentan dos tipos de depósitos orgánicos. (1) Manglares desde el sur hasta Pasacaballos y al oeste del Canal del Dique, desarrollados por influencia marina y continental. (2) Arrecifes coralinos en crecimiento, formando pequeñas islas emergentes.
- **Depósitos de playa (Dp):** Están localizados entre la línea media de las mareas y la línea alta que marca un cambio fisiográfico mostrado en el continente. En estos depósitos se consideran los bancos de arena, islas de barrera, promontorios y terrazas marinas, especialmente en la isla de Barú, y los deltas formados en las desembocaduras de las principales corrientes en el mar.

En Cartagena predominan rocas sedimentarias de origen marino profundo a litoral, con edades que van desde el Paleoceno-Eoceno medio hasta el Reciente, incluyendo formaciones como San Cayetano, Maco, Péndales, Arjona, Hibácharo, Tubará, Bayunca, Gravas de Rotinet, Arroyo Grande y La Popa, así como depósitos aluviales y de playa (INGEOMINAS, *et al.*, 2001).

Los principales efectos en la dinámica de sedimentación de la bahía de Cartagena se deben a dos estructuras antrópicas: la Escollera de Bocagrande y el Canal del

Dique. La Escollera acumula material grueso de la deriva litoral y actúa como barrera, afectando la dinámica del agua y los sedimentos. Los sedimentos finos (lodos) provenientes del Canal del Dique se depositan en las partes profundas de la bahía, reemplazando las arenas que predominaban anteriormente.

La colmatación de la bahía se debe a los sedimentos del Canal del Dique, cuyas trampas se colmataron en los años 90s, permitiendo la acumulación. Esto transformó la desembocadura a un sistema deltaico con dos brazos laterales de 1,5 km, fosilizando arrecifes y cambiando rápidamente la topografía en los últimos 27 años (Andrade, *et al.*, 2004).

En la figura 2.12, a continuación, se pueden observar la batimetría general de la Bahía de Cartagena, y, en particular, las acumulaciones sedimentarias descritas en los párrafos anteriores.

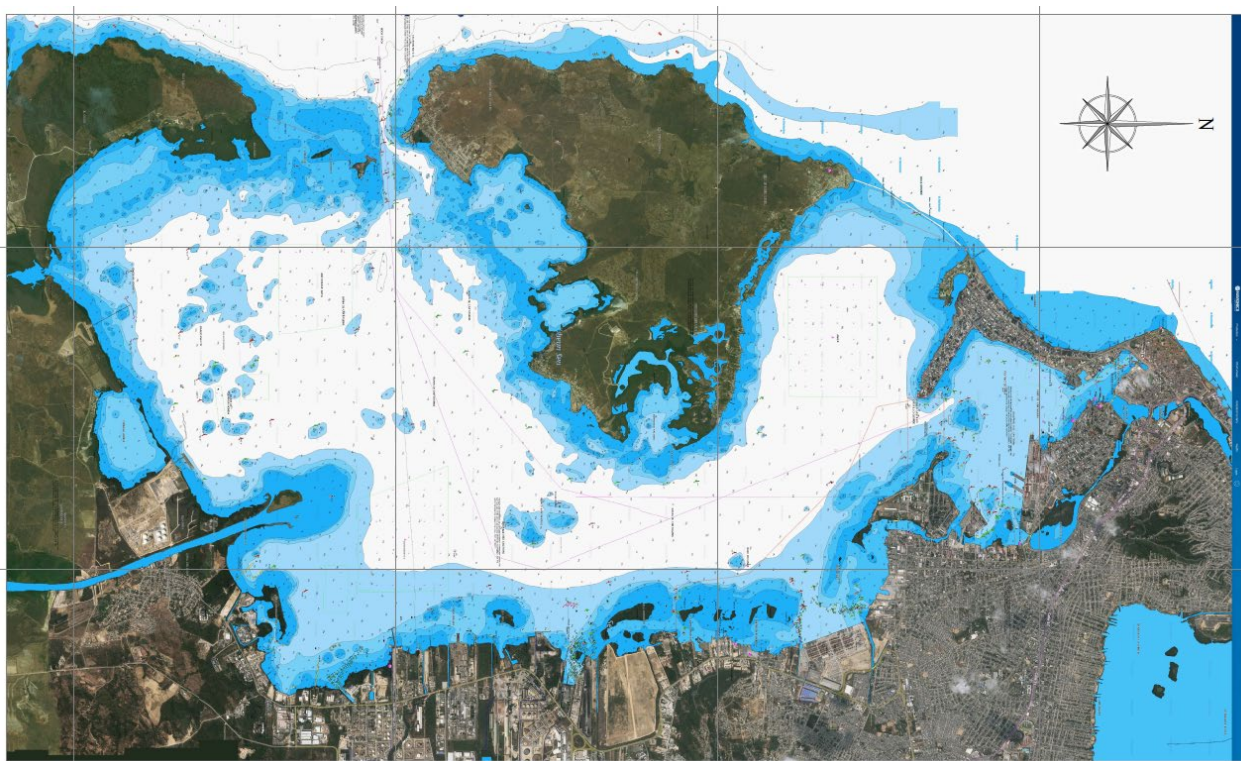


Figura 2.12: Topografía y batimetría de la Bahía de Cartagena de Indias.
Fuente: <https://webapp.navionics.com>, 2018.

2.3.2. Transformación del paisaje costero

El paisaje natural se transforma por la construcción, creando un paisaje emocional, viviente y trascendente. Cualquier acción humana que altere, ataque o agreda al medio físico se enmarca en el concepto de paisaje destruido (Martín-Antón, 2018).

La transformación del paisaje costero de Cartagena inició en el siglo XVI con la llegada de la cultura occidental. La conquista española y las continuas disputas entre británicos y españoles por el control del Mar Caribe convirtieron a Cartagena en un importante enclave estratégico militar, descrita como "la ciudad más hermosa, grande y fuerte de toda América Meridional". La importancia de Cartagena para los ingleses radicaba en que, al tomarla, podrían acceder a las minas, el Chocó, Portobelo y Panamá, facilitando la penetración en el Perú, según la Declaración del espía de Jamaica (Gómez Pretelt & Carvajal Díaz, 2011).

El Imperio Español, con el objetivo de proteger sus territorios conquistados, desarrolló una estrategia de defensa de las "llaves de las Indias", incluyendo la construcción de importantes fortificaciones adaptadas a las condiciones geográficas y climáticas de sus costas. La figura 2.13, ambientada en el año 1741 es un ejemplo claro del tipo de fortificaciones construidas.

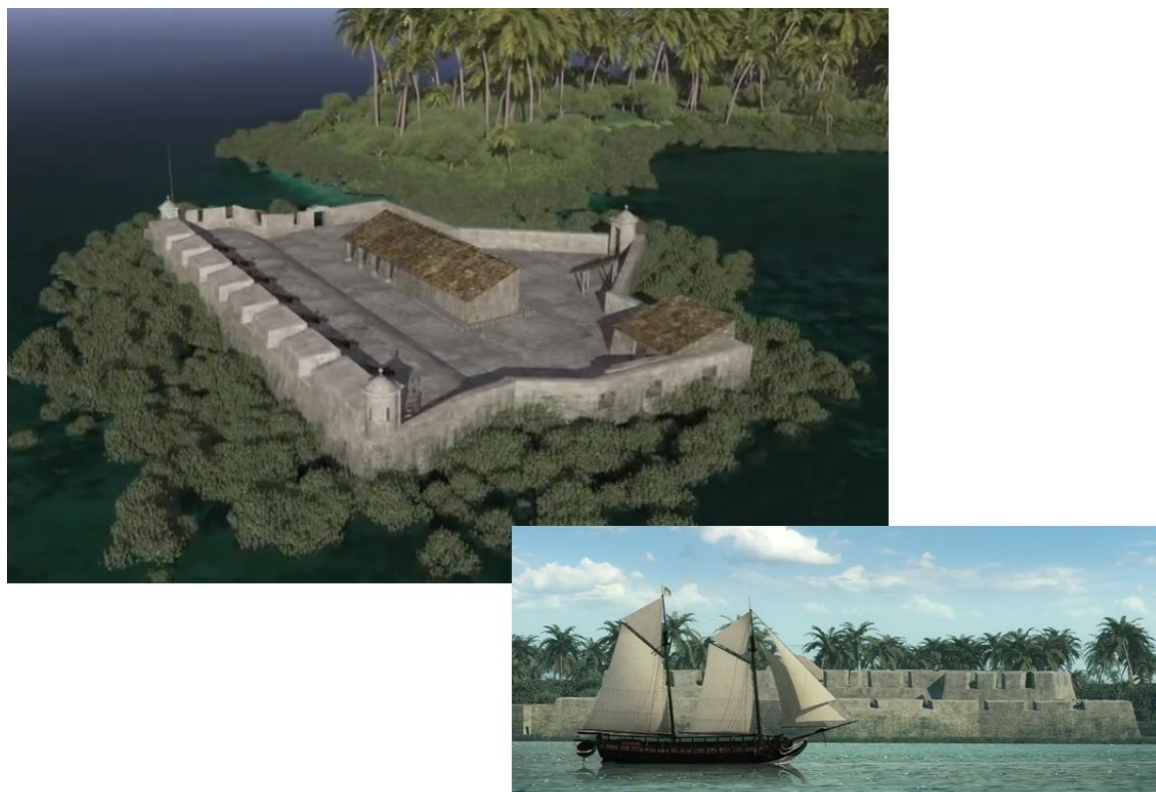


Figura 2.13: Fortificación San José de Bocachica, 1741.
Fuente: Museo Naval de Madrid. Exposición Blas de Lezo 2013.

Las obras de defensa del Imperio Español en Cartagena de Indias se construyeron aprovechando las características geográficas de la costa, como promontorios, puntas, islas y manglares, así como los canales abrigados de Bocagrande y Bocachica. Con la independencia, Cartagena sufrió una época de decadencia, de la que se recuperó gracias a una estrategia de ingeniería civil centrada en actividades portuarias y turísticas. Esto conllevó un proceso de ocupación del espacio litoral, con el aumento de instalaciones portuarias, cultivos en humedales, industrias cercanas a los puertos y un desarrollo masivo del turismo de sol y playa, lo que generó una fuerte presión sobre los usos anteriores de la franja costera y procesos especulativos difíciles de controlar (Aguiló, 2013).

La idea de paisaje litoral en Cartagena de Indias puede diferenciarse en las tres fases de transformación en las que la acción del ser humano captura el paisaje original costero, construye un entorno para protección de una de las principales ciudades-puerto de las Indias Occidentales, y culmina con la destrucción del paisaje, a través del cambio de la línea costera, ganando o perdiendo terrenos con el mar, a medida que altera los ecosistemas existentes y las características de las aguas que componen las bahías.

En las figuras 2.14 y 2.15 de la siguiente página, se puede observar la transformación del paisaje de Cartagena de Indias, con una vista panorámica que nos permita visualizar la evolución que el paisaje litoral ha tenido durante el transcurso del tiempo, desde que se forjaban las defensas de las Indias Occidentales, hasta el desarrollo de una de las ciudades portuarias más importantes de Colombia.



Figura 2.14: Vista aérea de la bahía de Cartagena de Indias en 1741.
Fuente: Museo Naval de Madrid. Exposición Blas de Lezo 2013.



Figura 2.15: Vista aérea de la bahía de Cartagena de Indias en 2018.
Fuente: Google Earth 2018.

2.3.3. Resultados, análisis y discusión

La bahía de Cartagena de Indias se divide a su vez en dos bahías, la primera llamada Bahía Interna que se desarrolla dentro de la línea imaginaria generada por Punta Castillo e Isla Manzanillo. La Bahía Externa se encuentra en el interior del cierre de Bocagrande al norte, y Bocachica al sur, y a través del "abrigo" de la isla de Tierrabomba. La figura 2.16 muestra los principales enclaves que permitirán ubicar los sectores o zonas estudiadas.

El análisis del cambio en el litoral de Cartagena de Indias se llevó a cabo en el sentido de las agujas del reloj, de modo que los resultados se mostrarán desde los sectores que tienen mayor población (norte), y después de un recorrido por la costa interior de la bahía exterior, se culminará con el análisis de la Isla Tierrabomba.

Una vez realizada la superposición de la costa de los planos vectorizados de 1780 y 2018 (figura 2.16), se mostraron sectores en los que se han presentado los mayores signos de acreción y erosión, encontrando que, precisamente, las obras humanas son las generadoras de estos grandes cambios en el paisaje costero. Las obras que resultaron en acreción corresponden a la construcción de escolleras como La Marina y Bocagrande, la desecación del Caño San Anastasio para dar lugar al barrio de La Matuna, la construcción de puertos en Isla Manga e Isla del Diablo, y el relleno en Isla Manzanillo.

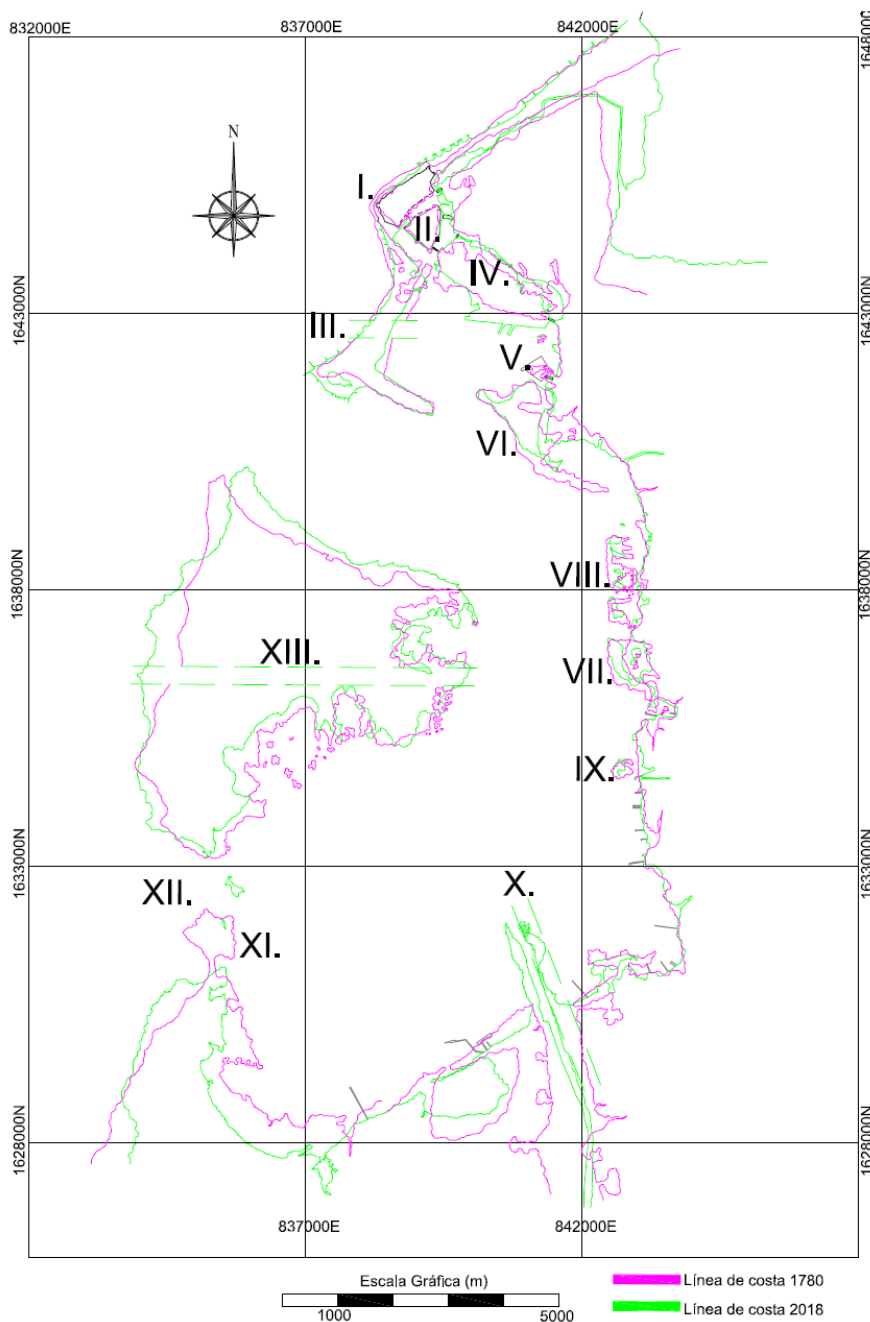


Figura 2.16: Superposición líneas de costa 1780 vs 2018.
 Fuente: Elaboración propia

La tabla 2.1 muestra el balance final en términos de erosión y acreción, en los sectores localizados según la figura 2.16.

Tabla 2.1: Balance final, erosión o acreción de Cartagena de Indias, Colombia

No.	Zona	Balance [km ²]		
I.	Escollera La Marina	0,04		
II.	Barrio La Matuna	0,07		
III.	Escollera Bocagrande	0,05	0,26	Acreción
IV.	Isla Manga	0,07		
V.	Isla Diablo			
VI.	Isla Manzanillo	0,03		
VII.	Isla Cocosolo			
VIII.	Isla Facunda	-0,45		
IX.	Isla Brujas			
X.	Canal del Dique	-	-1,48	Erosión
XI.	Isla Abanico	-0,51		
XII.	Bocachica			
XIII.	Isla Tierrabomba	-0,52		
	TOTAL	-1,22		Erosión

Las fortificaciones construidas por los españoles en Cartagena de Indias se clasifican en dos categorías principales: Fortificaciones Superficiales, que incluyen baluartes, castillos y murallas; y Fortificaciones Submarinas, representadas por las escolleras, específicamente la Escollera de la Marina y la Escollera de Bocagrande. Estas estructuras submarinas, edificadas hace más de trescientos años, continúan cumpliendo exitosamente la función para la cual fueron diseñadas, formando parte integral del sistema defensivo de la ciudad.

La escollera de la Marina, también conocida como escollera de Santo Domingo, fue construida por el Ingeniero Antonio de Arévalo entre 1762 y 1771 tras los daños ocasionados por un violento temporal en la muralla de la Marina. Arévalo construyó un dique de piedra a lo largo del área expuesta al oleaje, desde el baluarte de Santo Domingo hasta el de Santa Catalina. Esta obra de ingeniería hizo que las olas se rompieran lejos de la muralla, llegando a sus pies debilitadas y depositando arena entre el dique y la muralla, formando una playa permanente (Crespo-Francés, 2014). Arévalo construyó el espigón denominado La Tenaza entre 1779-1780 para cerrar el paso a posibles sitiadores, perfeccionando el diseño con aspilleras, banquetas, parapetos y fosos, y uniéndolo al baluarte de Santa Catalina mediante una galería (Segovia, 2009).



Figura 2.17: Escollera de la Marina, plano de 1765 y acreción en planta.

Fuente: Plano Antonio de Arévalo en 1765 y elaboración propia sobre fotografía aérea de Google Earth en 2018.

Esta primera obra analizada representó una acreción de 41.560 m².

La construcción de la escollera de Bocagrande se inició en 1771 debido a la apertura de un canal que conectaba la ciudad con Tierra Bomba, ampliado por temporales hasta formar una brecha de 2 km de ancho y 3 m de profundidad (Aguiló, 1999). Para defender la plaza, el ingeniero Antonio de Arévalo propuso un dique de dos alineaciones con un tramo de 500 varas sin cerrar, terminado en 1778. Según Iribarren, esta obra marítima de Arévalo se ha conservado admirablemente hasta la actualidad, a pesar del paso del tiempo (Romero Muñoz, 2000).





Figura 2.18: Escollera de Bocagrande, plano de 1771 y acreción en planta.

Fuente: Plano Antonio de Arévalo y elaboración propia sobre fotografía aérea Google Earth, 2018.

Esta obra supuso una acreción de 49.740 m², en concordancia con lo establecido por (Gómez Pretelt & Carvajal Díaz, 2011) “la escollera que cerró lo que se denominaba la Boca-Grande hizo que se acumulara material sedimentario que formara lo que se conoce hoy en día como El Laguito y regeneró la espiga de Castillo grande”.

Los resultados obtenidos en estas primeras zonas estudiadas son concordantes con lo expuesto por (Díaz González, 2006), quien también asegura que la evolución de la línea costera de Cartagena de Indias a lo largo de los años puede atribuirse, en gran medida, a la acción directa del ser humano y al cambio en el uso del litoral, lo que ha producido la alteración del paisaje costero, y que además, la transformación debe analizarse teniendo en cuenta las condiciones geomorfológicas características del caribe colombiano. Además, el resultado de la superposición de las líneas de costa de la tabla 2.1 permite observar que las áreas donde se produce la acreción corresponden con la ejecución de obras antropogénicas construidas a partir de la colonia, ya sea con el propósito de proteger la muralla, como es el caso de la escollera de La Marina entre 1762 y 1771 (Crespo-Francés, 2014), o como obras de protección ante las posibles invasiones piratas, como la escollera de Bocagrande en el período 1771-1778 (Andrade, *et al.*, 2004) & (Romero Muñoz, 2000). La construcción de la escollera de Bocagrande fue el detonante para la formación y regeneración progresiva de las playas de El Laguito y Castillo Grande. Esto se debió a los desplazamientos de arena característicos de la playa de La Boquilla y Bocagrande, los cuales alcanzaron estabilidad alrededor de 1961, después de la construcción de pequeños espigones y, posteriormente, del gran espigón en la playa del suroeste de Bocagrande. De esta manera, la implementación de infraestructura

costera jugó un papel clave en la evolución y configuración actual de estos sectores del litoral de Cartagena (Vernette, *et al.*, 1984).

Además de la construcción de las escolleras, Cartagena encontró otra forma de ganarle terrenos al mar, esta vez tras la desecación del caño San Anastasio que conectaba la Bahía de las Ánimas con la laguna de El Cabrero. Para complementar este proceso, por recomendación de los ingleses Pearson & Son Limited, también se demuele parte de la muralla entre la puerta del Reloj y la ciénaga del Ahorcado. Este terreno ganado es lo que actualmente se conoce como el barrio La Matuna. Las imágenes a continuación, se observa la evolución de este paisaje.



Figura 2.19: Sector de localización del barrio La Matuna

Izquierda: Caño San Anastasio. Plano de Juan de Herrera y Sotomayor, Servicio Geográfico del Ejército Madrid de 1730. Medio: La isla de Chambacú, al fondo Caño San Anastasio, fotografía de 1928. Derecha. Fotografía aérea 2018.

Como resultado, los terrenos ganados por desecación del caño ascienden a 57.028 m².

La construcción del puerto en Isla Manga por parte de la sociedad Portuaria de Cartagena y la SPRC Terminal, junto con la construcción del barrio Los Cedros de Manga, ocasionaron acreción de esta isla en 396.469 m².

En 1992, en el Gobierno del presidente César Gaviria, la empresa Muelles El Bosque, hoy Sociedad Portuaria Compañía de Puertos Asociados S.A., Compas, construyó el primer puerto privado de Colombia, dividido en dos muelles que se localizan en los bordes norte y occidental de la Isla del Diablo, ganándole al mar 70.513 m².



Figura 2.20: Cálculo de áreas de acreción Isla Manga e Isla Diablo
Fuente: Elaboración propia sobre imagen de Google Earth, 2018

La línea costera de Isla Manzanillo ha experimentado cambios significativos. En la zona norte se observan sectores de acumulación de sedimentos, posiblemente por procesos antrópicos como rellenos durante construcciones. Sin embargo, el resto de las playas del norte presentan erosión significativa. En la zona oeste predomina la acreción sedimentaria por rellenos antrópicos, mientras que en la zona sur predomina el efecto erosivo, con deforestación de manglares que ha acelerado el retroceso de la línea de costa. En los últimos 230 años, el balance final de Isla Manzanillo corresponde con acreción de 25.500 m² al mar, aunque es importante mencionar que la pérdida de manglar en el sur de la isla asciende a 17.500 m². Estos resultados son compatibles con el estudio del cambio de la línea de costa según (Gómez Pretelt & Carvajal Díaz, 2011) que concluyen que la acción humana ha cambiado significativamente la morfología del litoral de isla, alterando directamente la hidrodinámica costera. De hecho, los procesos antrópicos generados en los últimos 350 años han superado con creces los relacionados con los procesos naturales en esta zona. A esto se suman las amenazas naturales asociadas con el aumento del nivel del mar en el Caribe colombiano, lo cual ha intensificado los impactos sobre la línea de costa de la isla (Robertson, *et al.*, 2003).

En contrapeso, el aumento del nivel del mar y la deforestación ejecutada por los seres humanos han afectado severamente las zonas de la Bahía de Cartagena de Indias cuyas líneas de costa se conforman por manglares, formaciones de coral y praderas, presentándose en estas áreas las mayores pérdidas de terrenos frente al

mar. Históricamente, las praderas de pastos sublitorales fueron una de las comunidades biológicas de mayor desarrollo a lo largo del litoral de la bahía, interviniendo significativamente en los procesos físicos, químicos, geomorfológicos y biológicos de este sistema; sin embargo, estas extensas praderas han disminuido considerablemente en las últimas décadas (Díaz & López, 2003). La importancia de esta comunidad radica fundamentalmente en su capacidad de atrapar y estabilizar los sedimentos, en su elevada productividad biológica, en su significativa función en el reciclaje de nutrientes y en el suministro de alimento y protección a gran variedad de fauna durante toda o una parte importante de sus ciclos de vida (Phillips & Meñez, 1988).

En el costado este de la bahía, frente a Miraflores y Alboxnos se encontraban las islas de Cocosolo, Facunda, y Brujas, cuyas extensiones han disminuido y la erosión de esta zona se cuantifica en 377.132 m².



Figura 2.21: Cálculo de áreas de acreción Islas Cocosolo, Facunda, y Brujas
Fuente: Elaboración propia sobre imagen de Google Earth, 2018

El análisis histórico revela que en 1735 existía una isla de 42 hectáreas en el costado norte de Isla Barú, denominada Isla Abanico, la cual jugó un papel importante en la defensa de la Bahía de Cartagena. Esta isla apareció en mapas hasta finales del siglo XIX, pero comenzó a desaparecer en el siglo pasado, quedando hoy apenas una franja de manglar de 3,09 hectáreas. La comparación cartográfica muestra que entre 1780 y la actualidad, el área de Isla Abanico y el istmo que la unía a Isla Barú se han perdido en su totalidad, sumando un área de 425.330 m², que son acordes a los resultados obtenidos por (Andrade-Amaya, *et al.*, 2017). Esto evidencia los problemas de erosión y retroceso de la línea costera en esta zona entre Bocachica y Caño de Loro. La figura 2.22 evidencia el área perdida

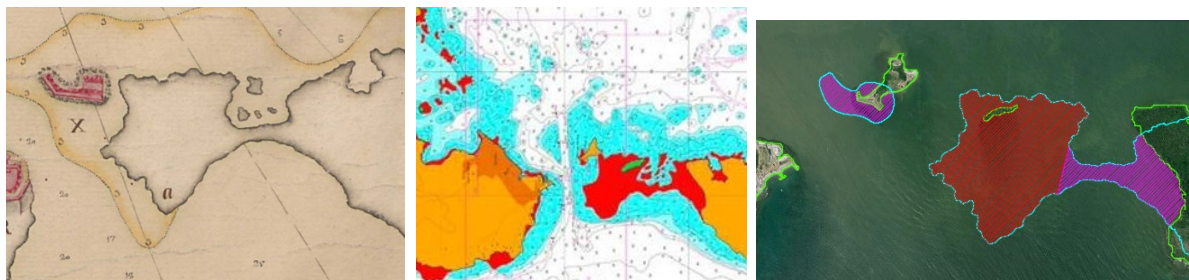


Figura 2.22: Cálculo de áreas de erosión de Isla Abanico
Izquierda: Plano del Puerto de Cartagena de Indias en 1780. Medio: Zonas de área costera emergidas y visualizadas en planos de 1854 y 2011. Derecha: Elaboración propia sobre imagen de Google Earth, 2018

Por último, el análisis de la línea de costa de la Isla Tierrabomba evidenció que en la isla se presentó mayor erosión que acreción, y el balance final muestra una pérdida de 520.935 m². Inicialmente, la Isla Tierrabomba se encontraba protegida por un ecosistema compuesto por barreras coralinas y extensas praderas marinas, los cuales ayudaban a la protección de la línea de costa (Díaz-M. & Gómez-López, 2003). Sin embargo, desde la apertura del Canal del Dique, este ecosistema sufrió una reducción exponencial, dejando expuesta y frágil la costa interna de la isla a la erosión (Mogollón Vélez, 2012). Actualmente, el ecosistema de manglar ha sido el principal elemento de defensa contra la erosión en esta zona. No obstante, este ecosistema de manglar también ha experimentado un retroceso, posiblemente generado por la contaminación y la tala realizada por las comunidades de Caño del Oro y Bocachica. La tendencia erosiva de la costa de Isla Tierrabomba se debe a fuertes olas del mar, cuya dirección predominante afecta las zonas norte, noroeste, oeste y suroeste de la isla, con alturas significativas y períodos medios que, al acercarse a la costa, contribuyen a la erosión y transporte de sedimentos (Castillo Charris & Gamarra Mendoza, 2014).

El análisis comparativo de la línea de costa del sur de la Bahía de Cartagena ha evidenciado la pérdida de islas completas y grandes sectores de manglares costeros, como ha sido cuantificado en este documento, y como ya habían indicado (Andrade-Amaya, *et al.*, 2017) y (Díaz González, 2004); situación que expone la costa y la tierra baja de Cartagena a una inundación sistemática, gradual y constante, mucho más acelerada que la media mundial, que es el resultado de dos fenómenos conocidos: el aumento del nivel del mar debido al calentamiento global y el hundimiento de la tierra (INVEMAR, 2017), o subducción provocada por el exceso de construcciones en el borde costero.

2.4. Rio de Janeiro, Brasil

Cidade de São Sebastião do Rio de Janeiro, es una ciudad con un rico legado histórico y portuario que ejerce de capital del estado de Río de Janeiro en Brasil. La ciudad está situada en la costa atlántica, en la porción sudoriental de la zona tropical de Sudamérica, y fue fundada en 1563. El litoral de la parte este de Río de Janeiro y de la Bahía de Guanabara, como en el resto de la costa brasileña, está marcado por un hábitat único que resulta de interacciones históricas y ecológicas entre especies de la Mata Atlántica y llanuras de arena oceánica, localmente llamadas restinga (arenal) (Scarano, 2002). Estas restingas se forman por el proceso de deposición de sedimentos a lo largo de las llanuras costeras de los mares y océanos. Los sedimentos, sobre todo arenosos, que constituyen los suelos calizos de este ecosistema, se depositaron principalmente por la acción del agua oceánica.

Este caso de estudio se contempla el área litoral formada por la Bahía de Guanabara (figura 2.23), que se sitúa en el Océano Atlántico y se extiende a lo largo de la costa este de la ciudad de Río de Janeiro, al sur de Duque de Caxias, Magé y Guapimirim, y a lo largo de la costa de San Gonzalo y Niteroi.

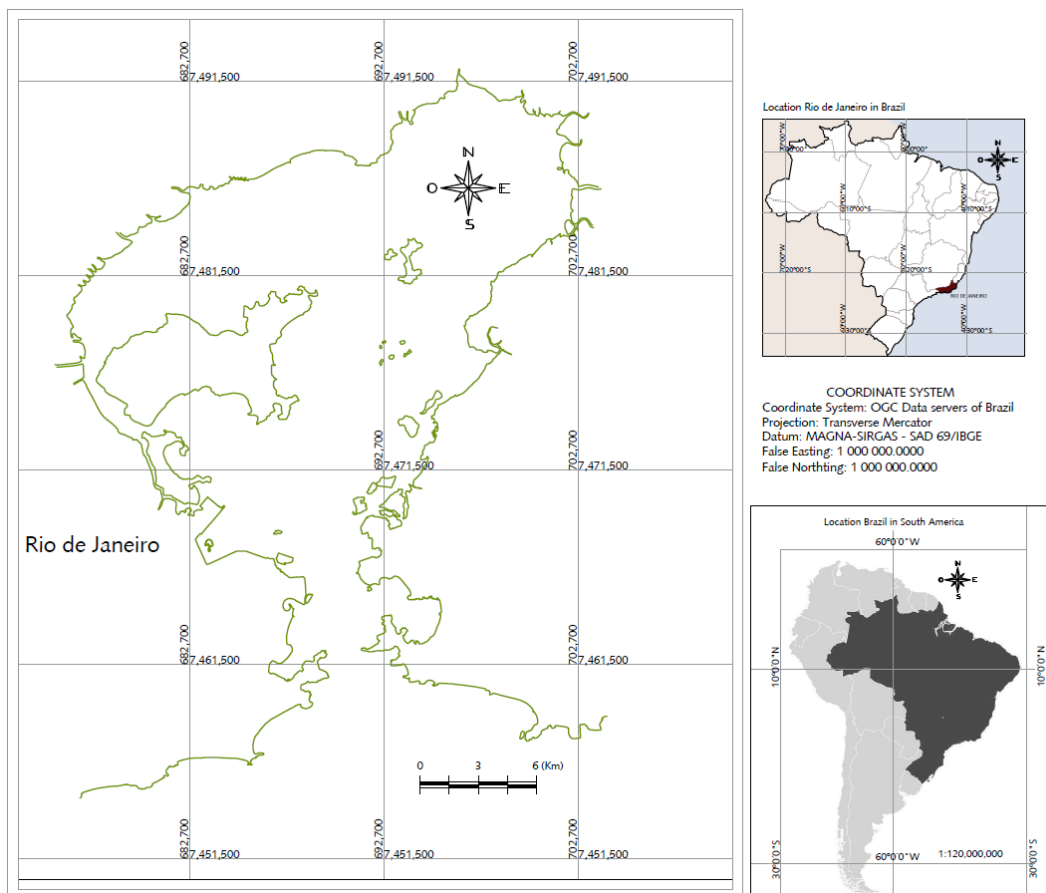


Figura 2.23: Localización georeferenciada de la Bahía de Guanabara

Fuente: elaboración propia

La Bahía de Guanabara es una de las mayores de la costa brasileña, con una superficie aproximada de 384 km² y un volumen medio de agua de 1,87 x 10⁹ m³ (Fonseca, *et al.*, 2013). Se considera una de las bahías más importantes de Brasil por su creciente actividad naviera, debida no sólo al comercio exterior y nacional, sino también a las actividades relacionadas con el petróleo y el gas que tienen lugar en ella. Buques de suministro y petroleros operan en la Bahía de Guanabara, entregando y recogiendo mercancías para plataformas petrolíferas y transportando casi el 20% de todo el petróleo importado de Brasil (Arauna Júnior, *et al.*, 2014). La longitud total del litoral de este estudio es de aproximadamente 331 km, lo que corresponde al litoral interior de la bahía, los litorales de las islas situadas dentro de la bahía, el litoral de Copacabana y el litoral que conduce a la playa de Piratininga, situada al sudeste de la bahía. El litoral de Copacabana también está bajo la jurisdicción del Estado de Río de Janeiro, pero está expuesto a la acción del Océano Atlántico de forma libre. El litoral continental tiene una longitud aproximada de 232 km, mientras que el de las islas es de unos 99 km.

La región de Guanabara fue habitada inicialmente por «hombres sambaquis» hace aproximadamente 2 millones de años, durante el Pleistoceno, más tarde por los tapuias y, por último, por los tupíes o tupí-guaraníes (concretamente los tupinambás) hasta la llegada de los europeos en el siglo XVI. Se calcula que en aquella época había un millón de tupinambás, de los cuales unos 15.000 pertenecían a la tribu de los tamoios y se concentraban en las orillas de la bahía de Guanabara. Los portugueses llegaron a Río de Janeiro (Río de Enero, en español), más concretamente a la bahía de Guanabara, el 1 de enero de 1502, al mando de Gaspar de Lemos. La ciudad-puerto debe su nombre precisamente a la fecha en que los europeos desembarcaron en la bahía. Durante la conquista y colonización, los portugueses se enfrentaron en varias ocasiones a los franceses que querían apoderarse de parte del territorio, por lo que las construcciones de defensa se originaron principalmente como medidas de protección de la costa (imaginariodejaneiro.com, 22).

Durante los primeros siglos de dominio portugués en Brasil, el modelo económico adoptado se basó en la extracción de recursos naturales, una práctica común en muchas otras colonias. La extracción de madera de Brasil, conocida localmente como "Tbirapitanga" o "pau-brasil", para la fabricación de tintes, y la caza de ballenas, cuyas partes del cuerpo se utilizaban para diversos fines, desde la alimentación hasta la construcción, eran actividades habituales. Además, los europeos consideraron necesario dominar la impresionante naturaleza local,

percibida como extremadamente amenazadora y con numerosos peligros e incomodidades, como la presencia de indios enemigos, animales feroces y venenosos, tormentas espantosas, calor abrasador e insectos molestos que transmitían enfermedades tropicales desconocidas (Canedo de F. Pinheiro, 2015).

Del mismo modo, el cultivo de caña de azúcar y el comercio de esclavos generaron importantes riquezas, lo que condujo a la ocupación de zonas del interior de Brasil, principalmente a lo largo de las riberas de los ríos utilizados para transportar la producción azucarera a Europa a través del puerto de Río de Janeiro.

La invasión napoleónica de la Península Ibérica en el siglo XIX llevó al Príncipe Regente Juan de Braganza a trasladar la corte portuguesa y la sede del Imperio a Brasil, convirtiendo a Río de Janeiro en el nuevo centro y capital del Imperio portugués. Tras la independencia en 1822, Pedro I y Pedro II gobernaron Brasil, siendo este último un símbolo de la patria y promotor del desarrollo de la ciudad. La abolición de la esclavitud impulsó el movimiento republicano, que presionó a los militares para dar un golpe de Estado en 1889, convirtiendo a Río de Janeiro en la capital del nuevo gobierno. En las primeras décadas del siglo XX, el prefecto Francisco Pereira Passos elaboró el Plan de Embellecimiento y Saneamiento de la ciudad de Río de Janeiro. Este plan abarcaba la construcción de un nuevo puerto y la transformación del litoral de la ciudad (suroeste de la bahía). Paralelamente, la continua afluencia de personas procedentes de zonas rurales provocó la reestructuración de la ciudad y la aparición de las inaugurales «favelas» (asentamientos humanos precarios) en las laderas de las colinas. La evolución de las necesidades de los habitantes y visitantes de la ciudad ha dado lugar a una nueva demanda de cambios constantes y continuos durante los primeros años del siglo XXI.

2.4.1. Condiciones climáticas, físicas y geomorfológicas

El clima del estado de Río de Janeiro es tropical, con lluvias durante todo el año, con máximas precipitaciones en verano junto con las temperaturas más elevadas. El clima del litoral está fuertemente influenciado por la Masa Tropical Atlántica de alta presión con sus vientos alisios del nordeste y por la Masa Polar Atlántica. La primera trae condiciones cálidas y húmedas y es responsable del intenso calor, que predomina en los meses de verano. La segunda es fría y más fuerte entre mayo y septiembre, acompañada de un aumento de la intensidad y frecuencia de los frentes fríos, responsables del brusco descenso de las temperaturas que puede

durar hasta una semana (Muehe & Lins-de-Barros, 2016). El clima de oleaje que caracteriza a la costa sur está condicionado por los frecuentes cambios en las condiciones de viento, asociados al paso de frentes fríos, y a la presencia constante de oleaje, generado por temporales en las altas latitudes del Atlántico Sur y disociado del viento local, (Melo, 1993) también menciona que en los casos extremos Río de Janeiro ha presentado periodos de oleaje del cuadrante sur de 10 a 16s con alturas significativas de hasta 4m.

La Bahía de Guanabara presenta un entorno de baja energía de las olas, lo que protege a sus playas de eventos de alta energía, aunque no las hace completamente inmunes a ellos. Las playas más cercanas a la entrada de la bahía, o situadas frente a la entrada del oleaje, se caracterizan por una dinámica más activa e incluso una mayor vulnerabilidad a la energía de las olas. Por el contrario, las playas ubicadas en el fondo de la bahía presentan una dinámica muy baja (Silva, *et al.*, 2016). En el interior de la bahía, los efectos del temporal se dejan sentir esporádicamente en las ensenadas de Flamengo y Botafogo y en las orillas de Ingá e Icaraí, en Niteroi. En Isla de Gobernador, la orilla orientada al este sufre algunos efectos de la acción del oleaje local generado por el viento del nordeste asociado a un apilamiento de agua que puede inundar la orilla de la playa. En general, sin embargo, el interior de la bahía está protegido, principalmente de la acción de las olas del temporal del sureste (Muehe, *et al.*, 2006).

En el caso de las playas de regiones urbanizadas, los eventos de resaca pueden provocar que la arena se vierta en aceras y avenidas, causando diversos daños, como la rotura de tuberías enterradas y la destrucción de bienes públicos. Al realizar la limpieza de calles y aceras, la arena no siempre se devuelve al medio ambiente, lo que a largo plazo puede llevar a una disminución de las reservas de arena y generar una tendencia a la erosión. Según los registros históricos de aproximadamente 107 años, las resacas más frecuentes en esta parte de la costa (Niterói) se producen entre los meses de marzo y agosto (Santos, *et al.*, 2004). En algunas ocasiones, las marejadas que azotan la Bahía de Guanabara provocan un bello espectáculo de olas altas y sucesivas, aptas para la práctica del surf. Uno de ellos fue registrado por el equipo de la Revista Surfear el 8 de abril de 2010, cuando la bahía fue azotada por marejadas del sudeste con períodos de 12 y 13 segundos, que al entrar en la bahía provocaron olas de 5,5 a 5,8 metros de altura. Como en otras ocasiones, el fuerte oleaje generó daños en tuberías y paseos marítimos (Muehe, *et al.*, 2006).

En cuanto a la calidad del agua, según un análisis realizado por el Instituto Estatal de Medio Ambiente de Río de Janeiro (INEA) durante tres años, la Bahía de Guanabara presenta variaciones espaciales, tal y como se observa en la figura 2.24. La región con mejor calidad de agua (71%) corresponde a la desembocadura de la bahía, tanto en la costa occidental (Río de Janeiro) como en la oriental (Niterói) (Región 2). El canal central (Región 1) obtuvo la segunda mejor calidad (65%), atribuida a la elevada socavación oceánica que ayuda a eliminar nutrientes y sedimentos, manteniendo altos los niveles de oxígeno disuelto. Los márgenes centrales de la bahía (Región 3) obtuvieron una puntuación media (56%) debido a la presencia de los puertos. La región al norte (Región 4) obtuvo la segunda puntuación más baja (47%), afectada por los aportes de contaminación de los hábitats de aguas poco profundas y manglares. Por último, el noroeste de la bahía (Región 5) presentó la menor puntuación (19%), generada por la escasa circulación y poca profundidad de los canales que separan las islas Gobernador y Fundación, con exceso de contaminación y degradación (IAN, 2017).

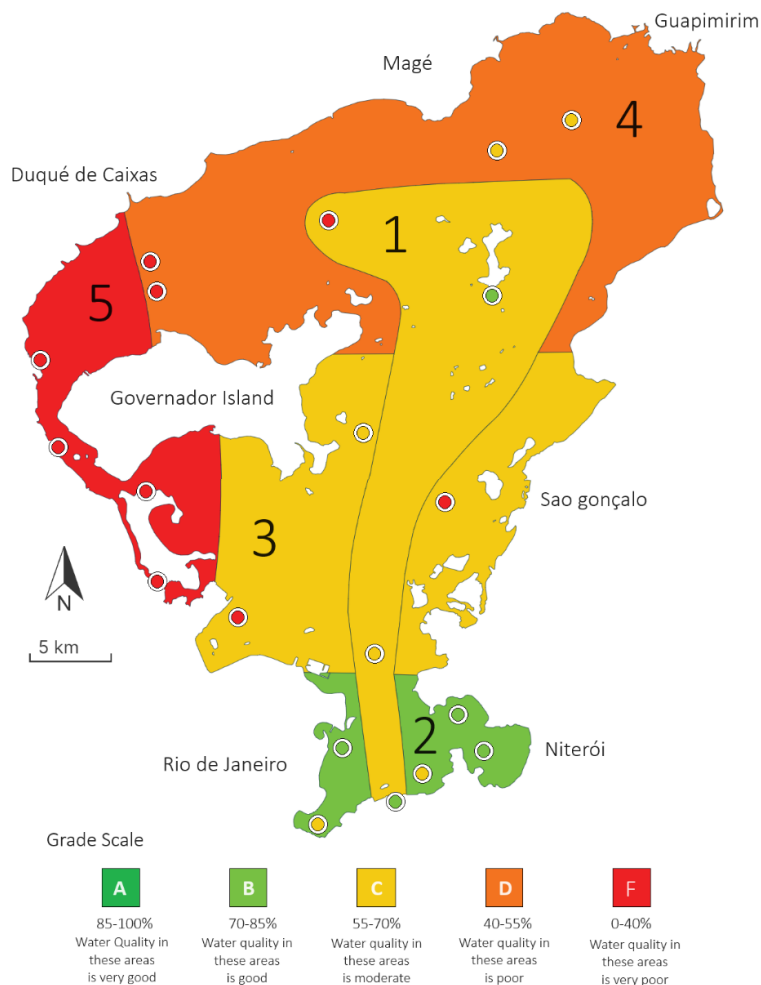


Figura 2.24: Calidad del agua de la bahía de Guanabara
Fuente: Instituto Nacional de Medio Ambiente de Río de Janeiro (INEA)

La morfología del litoral presentó cambios durante el período Cuaternario (Pleistoceno tardío y Holoceno temprano) debido a las variaciones del nivel del mar resultantes de las glaciaciones y los períodos interglaciares en los que se produjo el calentamiento global (Martin, *et al.*, 1984). Estos cambios incluyeron la formación de lagunas saladas interiores resultantes del cierre de bahías o calas primitivas de tamaño pequeño a mediano, así como el desarrollo de cordones dunares paralelos a la costa.

De acuerdo con (Canedo de F. Pinheiro, 2015) investigaciones realizadas por geógrafos y geólogos concluyeron que, hace miles de años, el nivel del mar estaba unos 130 metros por debajo de su nivel actual (Ruellan, 1944). En esta época, por tanto, en gran parte de la plataforma continental actualmente sumergida, existían zonas de restinga (arenal - vegetación costera arenosa), acantilados y dunas, que albergaban una exuberante megafauna como mastodontes, tigres dientes de sable, armadillos gigantes y perezosos de hasta seis metros de largo (Silva Amador, 1997). La causa de la desaparición de estos animales es aún incierta: pudo haber una escasez de alimentos derivada de la última glaciación, o puede que no sobrevivieran a la subida de las aguas del océano Atlántico en toda la zona costera de la plataforma continental. En cualquier caso, se sabe que fue esta inundación, hace unos 12.000 años, la que dio origen a la bahía de Guanabara (Colin, 1900). La batimetría de la bahía ha sufrido importantes modificaciones desde su creación, estudios realizados por (Kjerfve, *et al.*, 1997) indican la presencia de un canal central con una profundidad de 30 m. Sin embargo, (Arauna Júnior, *et al.*, 2014) han identificado la aparición de extensos depósitos de lodo en las partes interiores de la bahía, que atribuyen al transporte acelerado de materiales clásticos fluviales a la bahía como resultado de las actividades antropogénicas en la cuenca de drenaje. El transporte activo de materiales clásticos fluviales a la bahía, acelerado por las actividades antropogénicas en la cuenca de drenaje, ha dado lugar a una profundidad media del agua en la bahía de 5,7 m. Según (Muehe, *et al.*, 2018), la profundidad media de la bahía es de aproximadamente 3 m en su sección más interior, 8 m en su parte central y 17 m en el canal de entrada. La figura 2.25 se obtuvo utilizando la herramienta Chart Viewer y muestra el mapa batimétrico del canal de entrada a la bahía.

En cuanto a la mineralogía de los sedimentos presentes en el interior de la Bahía de Guanabara, la fracción arenosa está constituida esencialmente por granos con formato esferoidal, compuestos principalmente por cuarzo, feldespato y amatista. También existen conchas calcáreas en forma de placas de varios tamaños. Los

sedimentos procedentes de la parte sudeste de Isla de Governador tienen una densidad mayor que los de la parte noroeste (Arauna Júnior, *et al.*, 2014).

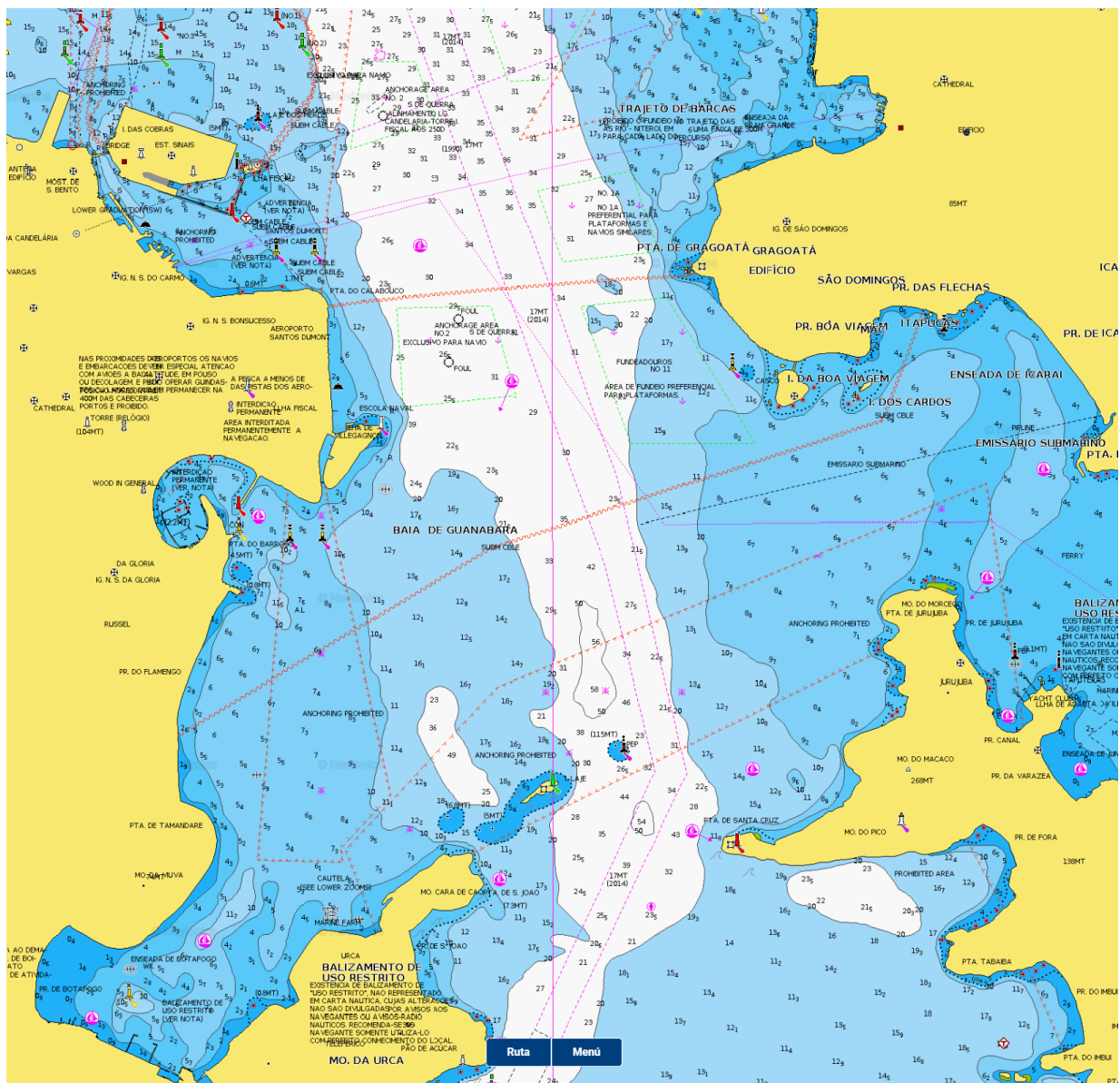


Figura 2.25: Topografía y batimetría del canal de entrada en la Bahía Guanabara.

Fuente: <https://webapp.navionics.com>, 2022.

La configuración actual de la Bahía de Guanabara es el resultado de la transgresión del Holoceno, que sumergió los tramos inferiores de la red de drenaje. Las curvas batimétricas de la bahía muestran las hendiduras de los talvégos, que aún hoy son visibles. La bahía es una zona que se rebajó a lo largo de un eje de falla que rompió el macizo costero. La depresión así formada abrió una conexión entre el océano y la fosa de Guanabara y sirvió de punto de convergencia para la red de drenaje fluvial procedente de la escarpa de Serra do Mar y el reverso del macizo costero (Ruellan, 1944). La línea de costa está sujeta a cambios debido a la

influencia de la dinámica litoral, que, como ya se ha dicho, depende de la morfología de la línea de costa. La figura 2.26 presentada por (Muehe, *et al.*, 2006), representa la geomorfología del litoral del caso de estudio nº2, presentada en secciones. Esto servirá de base para comprender la respuesta morfodinámica de cada sección al comportamiento del clima costero, fluidodinámica.

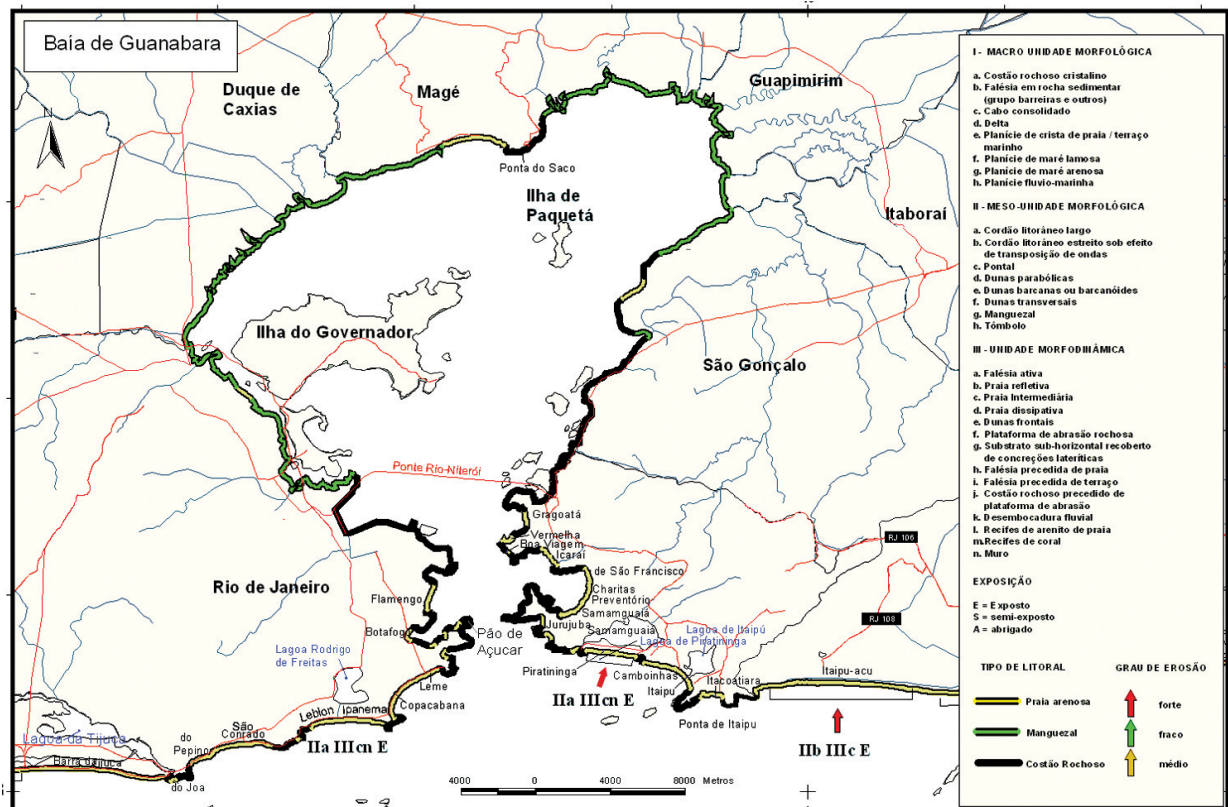


Figura 2.26: Geomorfología costera de la Bahía Guanabara.
Fuente: Erosão e progradação no litoral brasileiro, 2006. Muehe *et al.*

2.4.2. Transformación del paisaje costero

La evolución del paisaje costero estuvo marcada inicialmente por las estrategias de fortificación de la colonia, un poco más tarde por los procesos de mejora técnica y estética llevados a cabo por el imperio portugués asentado en la ciudad y, por último, por las obras realizadas durante el periodo republicano.

La ciudad de Río de Janeiro, situada en la encrucijada estratégica de Europa y los puertos del sur del continente americano durante la época colonial, atrajo a un número considerable de colonos que se dedicaron a la explotación intensiva de los recursos tropicales que se encontraban a orillas de los caudalosos ríos que atravesaban la región de la «Baixada Fluminense» y desembocaban en la bahía de Guanabara. Además, los ríos se utilizaban para el transporte de cultivos alimentarios destinados al consumo de la población local, tanto para la exportación

a través del puerto. Paralelamente, la bahía se vio sometida a la acumulación de sedimentos orgánicos e inorgánicos en el fondo y a lo largo de sus lechos, lo que impidió y disminuyó la extensa navegación fluvial entre las partes bajas de la bahía y el interior de la baixada. La amenaza de pérdida del equilibrio ambiental de la bahía comenzó con el crecimiento exponencial de la población a lo largo del siglo XIX, que generó la acentuada erosión de los ecosistemas periféricos debido a la destrucción de los manglares y pantanos típicos de una región tropical con suelos arenosos y un nivel freático muy próximo a la superficie. La construcción del puerto de Río de Janeiro se vio facilitada por el proceso de retroceso del mar. También se drenaron las lagunas del continente. La realización de intervenciones urbanísticas y de infraestructuras provocó la aparición de inundaciones en la ciudad de Río de Janeiro, fenómeno que persiste hasta hoy. Además, la capacidad de los ríos de la Baixada Fluminense para mantener sus caudales de conexión con la ciudad imperial se vio disminuida tras la colmatación provocada por la deforestación de la Mata Atlántica (Silva, 2018).

En el siglo XVIII, la costa occidental de la Bahía de Guanabara no presentaba una línea de tierra continua, sin embargo, debido a la necesidad de protegerse de las incursiones de los corsarios franceses en la bahía durante la segunda mitad del siglo XIX, se llevó a cabo una intervención que consistió en un proceso de rellenos realizado en esta parte de la costa para conformar islas y pequeñas calas (sacs) en las localidades de Gamboa, Saúde, Santo Cristo y Cajú, especialmente entre el Morro da Conceição y Saúde.

Además, el litoral de Río de Janeiro sufrió cambios significativos a principios del siglo XIX, impulsados por la práctica del baño de mar, que se difundió ampliamente tras la llegada de la Familia Real en 1808. Inicialmente, los baños se realizaban en lugares como la playa de Cajú, donde se construyó una casa de baños para atender al Príncipe D. João VI, y la playa de Santa Luzia, frecuentada por diferentes clases sociales. En 1814 se construyó el primer hotel brasileño, el Hotel Pharoux, en la región de la actual Praça XV. Durante la época colonial y hasta principios del siglo XIX, existía el muelle de Valongo, almacén de esclavos y sal. La playa de Santa Luzia, inicialmente devaluada y abandonada, comenzó a valorizarse a partir de 1852 con la inauguración de un hospital y el traslado del cementerio. En 1859, se fundó la Sociedad Alemana de Gimnasia en esta playa, que se convirtió en el lugar preferido de los clubes de regatas y de los baños de mar (Gerson, 2000).

El barrio de Copacabana está situado en la parte sur de la ciudad de Río de Janeiro. Antes de la llegada de los colonos, la zona era una vasta y árida extensión de arena, conocida por los indios Tupi como socó-apê-nupã. La transformación del barrio y sus playas comenzó a finales del siglo XIX, cuando la ciudad empezó a extenderse hacia Copacabana con la construcción de un túnel (conocido como Túnel Viejo) en 1892, que conectaba los barrios de Botafogo y Copacabana. Con la Reforma Pereira Passos las playas abiertas de la ciudad situadas en la Zona Sur se hicieron más accesibles, mientras que los baños de mar de la zona centro de la ciudad fueron inviables debido a la incorporación de las playas a la zona portuaria (O'Donnell, 2013). Al sur se construyó el Fuerte de Copacabana a principios del siglo XX, con el objetivo de servir como sistema defensivo para la ciudad de Río de Janeiro y su puerto. La construcción de esta estructura finalizó en 1914. Desde el fuerte hasta la Ponta do Leme, se desarrolla el litoral de Copacabana, articulado en gran parte por la Avenida Atlántica, una importante vía de comunicación y acceso a esta zona costera.

Además, a principios del siglo XIX, el litoral de la zona central, comprendido entre el actual centro de la ciudad y el embalsamiento de Botafogo, fue profundamente modificado. Algunas de las playas se extinguieron debido a la recuperación de tierras, mientras que otras vieron sus contornos totalmente modificados. Los temporales marítimos y los daños observados en algunas playas, como Saúde y en la orilla de la playa de Gloria, incentivaron obras en el litoral. En las primeras décadas del siglo XX, el contorno sinuoso de la costa entre la entrada de la Bahía de Guanabara y la playa de Botafogo, con pequeños golfos y playas de bolsillo, fue sustituido por un litoral rectificado y amurallado, sin dejar espacio para una franja de arena ni la práctica del baño de mar. Esta transformación se llevó a cabo para la renovación de la zona portuaria y la construcción de la Avenida Beira Mar, que comenzó en 1906. Estas obras formaban parte de una empresa concebida por el alcalde Pereira Passos denominada la Reforma Pereira Passos. Durante esta época, se llevó a cabo el primer gran proyecto de recuperación de tierras utilizando, en parte, terrenos procedentes del desmantelamiento de las colinas de Senado y Castelo, finalizado en 1922, así como la construcción del primer terraplén y un dique de contención en la playa de Flamengo (Lins-de-Barros, *et al.*, 2019). Las transformaciones del frente marítimo de Río de Janeiro se llevaron a cabo según las especificaciones del renombrado artista y naturalista brasileño Burle Marx. Estos cambios se llevaron a cabo entre 1930 y 1980, con el objetivo específico de transformar el paisaje construido de la ciudad.

En 1923, se inauguró el Copacabana Palace Hotel aproximadamente en el centro de la playa de Leme Copacabana. A diferencia de las playas situadas en la entrada de la Bahía de Guanabara, Copacabana presentaba características geomorfológicas particulares. En la década de 1940, todo el paseo marítimo paralelo a la playa comenzó a urbanizarse, adquiriendo gradualmente el aspecto actual. En las zonas antes ocupadas por pescadores y campos de dunas, se construyeron casas cerca de la línea de costa, lo que dio lugar a los primeros casos de daños en las estructuras urbanas relacionados con el ataque de las olas durante los temporales marítimos, ya que las dunas delanteras y la franja de arena no eran muy anchas. Dos grandes proyectos alteraron profundamente el trazado original de la costa de Copacabana. El primero fue la construcción del Parque do Flamengo (Aterro do Flamengo), un vertedero de 1.200.000 m² creado en el borde de la bahía de Guanabara, inaugurado en 1965. El segundo fue el acondicionamiento artificial de la playa de Copacabana, iniciado en 1970 y concluido dos años más tarde, con el objetivo de garantizar la seguridad de los edificios y la Avenida Atlántica, mediante el aporte de aproximadamente 5 millones de toneladas de arena, tras la alimentación artificial, la anchura de la playa pasó de una media de 55 m a 90 m (Vera-Cruz, 1972). A pesar de su éxito, la alimentación artificial no impidió la erosión en el extremo occidental de la playa (Lins-de-Barros, *et al.*, 2019). Las figuras 2.5 y 2.6 ilustran la evolución del paisaje percibida por el artista gráfico Carlos Gustavo Nunes Pereira, más conocido como GUTA.

Otra de las grandes obras viarias que afectaron al litoral carioca fue la Avenida Brasil, vía rápida construida en 1941 y posteriormente designada como la primera carretera federal de Brasil en 1948. Con una longitud total de 58,5 kilómetros, es la más extensa del país, aunque actualmente solo un tramo de 2,3 kilómetros mantiene la denominación exclusiva de "Avenida Brasil". Desde su inauguración en la década de 1940, esta vía ha generado una dinámica de aceleración e inercia para los habitantes de la ciudad, que la recorren en diversos medios de transporte, como trenes, autobuses, furgonetas, motocicletas, automóviles e incluso trolebuses. (Campello Torres, 2018). La construcción de esta avenida comenzó en dirección sur-norte entre los suburbios de Leopoldina y la Bahía de Guanabara (actualmente entre el Intersección Cordovil <Av. Brasil, 640> y el Viaducto del Gasómetro <Av. Brasil, Cajú>), siendo necesarias obras que incluían vertederos en el mar. Según lo documentado por (Abreu, 2006), la costa fangosa, que estaba escasamente poblada y en gran parte sin desarrollar a principios del siglo XX, experimentó el mayor aumento de asentamientos informales de la ciudad de Río a mediados del

siglo XX. Con el tiempo, esta región costera de baja altitud ha sido atravesada por grandes infraestructuras viarias, como el viaducto de Gasómetro, que conecta con el puente Río-Niteroi, y la Línea Roja, que une la zona sur con la autopista Río-São Paulo (Vía Dutra). Además, se han construido la Línea Amarilla y el viaducto BRT Transcarioca, que cruza los suburbios hasta Barra da Tijuca, en la zona oeste (Moraes, 2022).

La construcción del barrio Urca, situado junto al Pan de Azúcar fue otra forma de transformar el litoral. Este nuevo barrio se realizó íntegramente en un terraplén formado con la arena de la bahía de Guanabara que se arrojaba sobre los acantilados. Esta obra masiva fue importante, no sólo por su tamaño, o por su cercanía a Pan de Azúcar, sino sobre todo porque estableció una nueva tendencia de expansión hacia el sur, hacia la costa abierta (Andreatta, *et al.*, 2009).

La actividad humana ha transformado significativamente el paisaje costero de la Bahía de Guanabara, especialmente en la Isla del Gobernador, donde se encuentra el Aeropuerto Internacional de Galeão. Originalmente establecido como Escuela de Aviación Naval en 1923, el aeropuerto se transformó en una base militar durante la Segunda Guerra Mundial, con amplias mejoras en las pistas, hangares y terminales. En 1952, el aeropuerto se convirtió en el principal puerto de entrada a Río de Janeiro. Posteriormente, en 1977, asumió todo el tráfico internacional, aunque en 1985 perdió parte de este protagonismo. Sin embargo, la implantación de la legislación sobre escalas obligatorias permitió que Galeão recuperara su importancia. En 1991 y 1999 se realizaron renovaciones y ampliaciones para preparar el aeropuerto para la Cumbre de la Tierra y los Juegos Olímpicos de 2016, respectivamente. Estas transformaciones a lo largo del tiempo han marcado un hito en la evolución del paisaje de la Isla del Gobernador y su entorno costero (Thompson, 2022). La isla del Gobernador, la mayor de la bahía de Guanabara, ha sufrido problemas de erosión costera en las últimas décadas. La erosión se debe principalmente a la construcción y montaje de siete oleoductos que atraviesan la isla desde el principal terminal de petróleo en Isla D'Água hasta la Refinería Duque de Caxias (REDUC). La expansión de las actividades urbanas e industriales asociadas a la industria del petróleo y del gas ha contribuido a agravar los problemas de erosión (Muehe & Valentini, 1998).

La isla Paquetá es una de las que menos cambios ha experimentado en su litoral desde la época colonial hasta el siglo XXI.

Por su parte, la isla de Fundación, es consecuencia de un terraplén artificial construido en el emplazamiento de un antiguo archipiélago. La construcción de este terraplén comenzó a principios de los años 50 (1949-1952) (Rocha , *et al.*, 1998). Las islas que constituían el archipiélago se denominaban Catalo, das Cabras, Fundación, Pindaí do Ferreira, Pindaí do França, Bom Jesus y Sapucaia. El terraplén artificial se construyó con el objetivo de proporcionar viviendas a la Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ). La Figura 2.27 ilustra una superposición de la actual isla de Fundación con el archipiélago antes de los rellenos interinsulares.

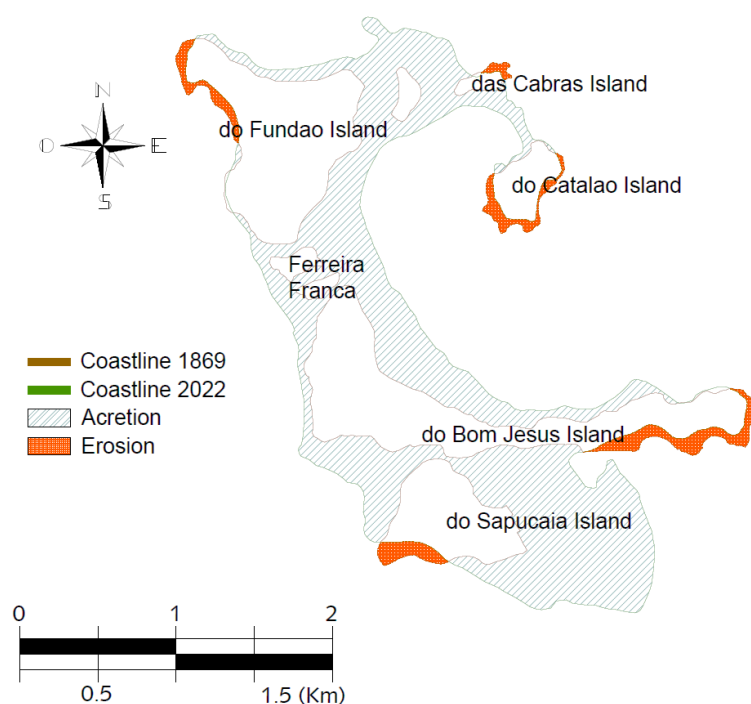


Figura 2.27: Superposición isla Fundación e islas originales.
Fuente: elaboración propia

El interior de la bahía de Guanabara alberga multitud de islas e islotes, cuyo número exacto es difícil de determinar. Según el especialista (Silva Amador, 2012), el número de islas e islotes de la bahía de Guanabara en el siglo XVI era de 127. Sin embargo, en la actualidad ese número se ha reducido a unas 65.

La urbanización de la costa este y sureste del estado de Río de Janeiro ha sido un proceso continuo, impulsado por la expansión del área urbana, especialmente en ciudades como Niteroi, Cabo Frío y Macaé. Esta expansión se ha visto facilitada por la construcción del puente sobre la Bahía de Guanabara entre Río de Janeiro y Niteroi en 1974, la exploración de petróleo en la Cuenca de Campos y el crecimiento del turismo. A la luz de las consideraciones anteriores, ha sido

propuesto en varias ocasiones la posibilidad de implantar la regeneración artificial de playas, supeditada a la identificación de fuentes de sedimentos adecuadas (de Oliveira & Muehe, 2013). La regeneración artificial de la playa se ha llevado a cabo en la playa de Piratininga, que sirve de punto de partida para el presente estudio.

2.4.3. Resultados, análisis y discusión

Las fortificaciones coloniales, que corresponden al *Paisaje Construido* según este grupo de investigación, se iniciaron en el siglo XVI y transformaron definitivamente el paisaje costero oriental de Río de Janeiro y la Bahía de Guanabara. El *Paisaje Original* (natural), compuesto por exuberantes bosques, aguas prístinas y pequeñas ensenadas, se transformó irrevocablemente en una de las ciudades más visitadas del mundo, donde coexisten los paisajes *Construido*, *Destruído* y *Reconstruido*.

La figura 3.3 representa el litoral en 1869, comenzando en el cabo de La Gavia y continuando por el fuerte de San Juan, donde entra en la bahía de Guanabara, y terminando en el fuerte de Santa Cruz, punto de salida de la bahía. La figura 3.4 corresponde con una imagen producida a partir de fotografías aéreas obtenidas de Google Earth durante el año 2022, que proporciona una representación más actualizada de la línea de costa.

Tras obtener las líneas de costa base de la época colonial (mapa de 1869) y la obtenida de Google Earth (2022), se realizó una superposición. Se observó que no es posible hacer que encajen como líneas continuas. Por lo tanto, la línea de costa colonial se dejó como plantilla, mientras que la línea de costa actual se desplazó para ajustar las líneas más adecuadamente y realizar el análisis. La figura 2.28 muestra la superposición que mejor se ajusta a las dos líneas costeras. La Tabla 2.2 establece las áreas de acreción o erosión presentes en cada sección, así como la cuantificación final. Como se observa, el área del segundo caso de estudio presenta una acreción favorable superior a 14 km².

El estudio se realizó en el sentido contrario de las agujas del reloj, comenzando por la playa de Piratininga y continuando por el interior de las bahías, analizando las costas de las islas principales. El estudio concluyó con el análisis de la playa de Copacabana, en el extremo suroeste de la bahía. En la sección siguiente se describirán las áreas en las que se obtuvieron resultados con valores de acreción o erosión mayores que 0.5 km².

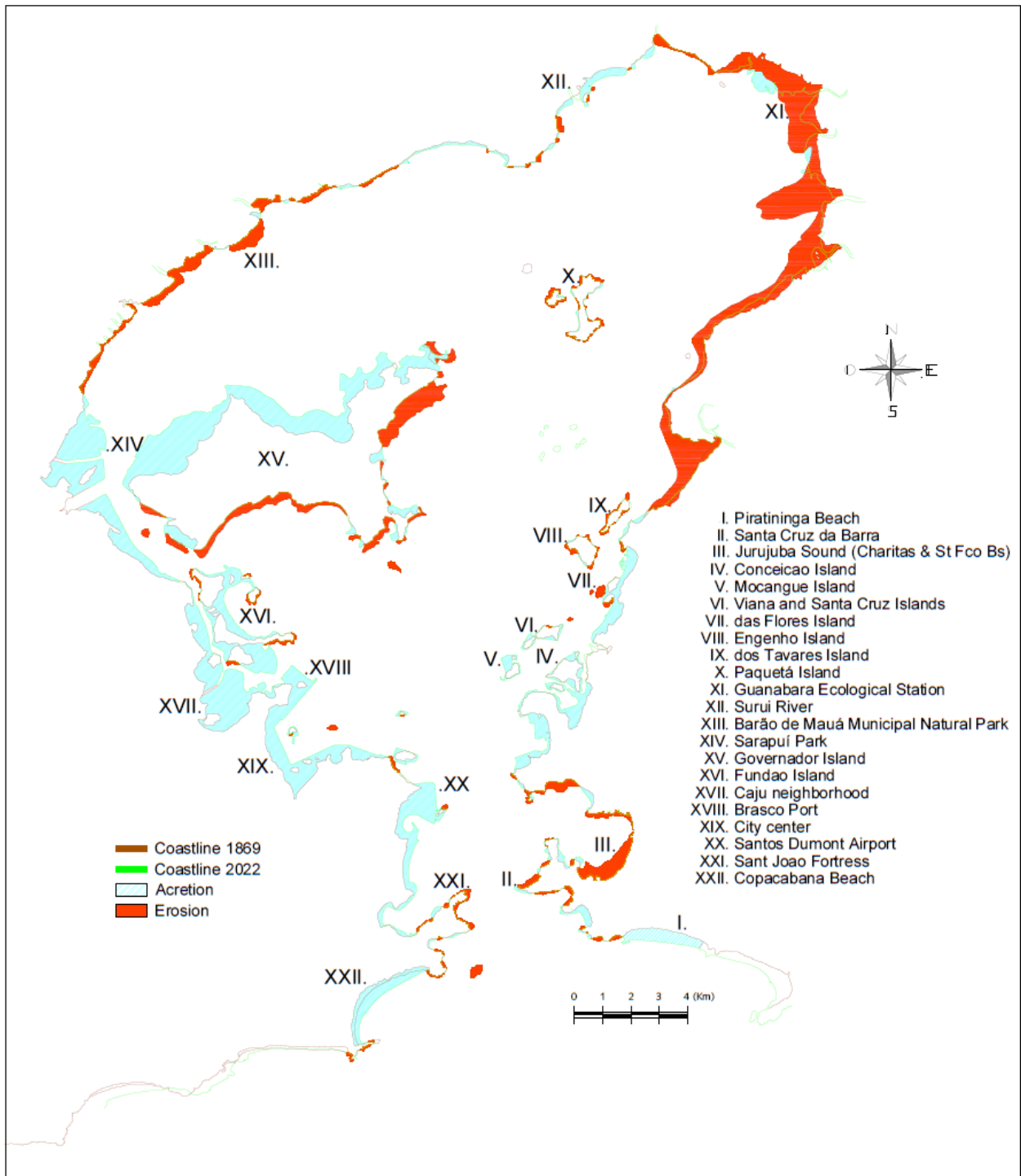


Figura 2.28: Superposición y áreas de acreción y erosión.
Fuente: elaboración propia

Tabla 2.2: Balance final, erosión o acreción de la costa este de Río de Janeiro y la Bahía de Guanabara, Brasil

No.	Zona / Segmento	Acreción [km ²]	Erosión [km ²]	Balance [km ²]
I.	Piratininga	1.08	0,00	1.08
	Segmento entre la zona I - II	0.3	-0.2	0.1
II.	Santa Cruz da Barra	0.05	-0.13	-0.08
	Segmento entre la zona II - III	0.21	-0.06	0.15
III.	Seno de Jurujuba	0.11	-1.48	-1.37
	Segmento entre las zonas III - IV	1.06	-0.09	0.97
IV.	Isla Conceição	0.99	0,00	0.99
V.	Isla Mocangue	0.23	0,00	0.23
VI.	Islas Viana y Santa Cruz	0.17	-0.02	0.15
VII.	Isla das Flores	1.09	-0.15	0.94
VIII.	Isla do Engenho	0.04	-0.1	-0.06
IX.	Isla Dos Tavares	0.02	-0.11	-0.09
	Segmento entre zona IX - X continente	0.09	-0.03	0.06
X	Isla de Paquetá	0.12	-0.25	-0.13
XI.	Estación Ecológica de Guanabara	0.61	-13.52	-12.91
XII.	Área del río Surui	1.16	-0.55	0.61
XIII.	Parque Natural Municipal Barao de Maua	0.15	-1.9	-1.75
XIV.	Área del Parque Sarapuú	5.11	0,00	5.11
XV.	Isla Gobernador	10.79	-3.99	6.8
XVI.	Isla Fundación	2.59	-0.24	2.35
XVII.	Barrio de Cajú	4.01	0,00	4.01
XVIII.	Puerto de Brasco	1.02	0,00	1.02
XIX.	Litoral continental del centro de la ciudad	2.52	0,00	2.52
	Islas del centro de la ciudad	0.25	-0.05	0.2
XX.	Aeropuerto Santos Dumont	1.26	-0.02	1.24
XXI.	Fortaleza de Sant Joao	1.3	-0.38	0.92
XXII.	Playa de Copacabana	1.47	-0.03	1.44
Total (km²)		37.8	-23.3	14.5

Zona I, Playa Piratininga es uno de los destinos más populares de Niteroi, con una longitud aproximada de 2,5 km. La playa está directamente expuesta al oleaje del Océano Atlántico, y el oleaje es bastante constante, aunque tiende a ser plano durante los meses de verano. La mayor parte del oleaje en este lugar se origina en marejadas de fondo, con un ángulo de oleaje óptimo que emana del sureste. Como consecuencia del oleaje y de la vulnerabilidad de sus playas, en las últimas décadas se han producido problemas relacionados con la destrucción del malecón y de las carreteras, entre otras estructuras. Además, la variación de anchura a lo largo del arco de playa sugiere la acción de la corriente de deriva litoral hacia el oeste. El papel preponderante de las corrientes de deriva litoral en el transporte longitudinal de sedimentos y el desplazamiento transversal de arenas desde el frente de playa hacia el frente de playa, y viceversa, es el principal mecanismo responsable de la movilidad de sedimentos a lo largo de la playa de Piratininga. Los resultados obtenidos en esta zona muestran un 1.08 km² acreción de la playa desde la época colonial hasta nuestros días. Esto se explica por la frecuente alimentación artificial de la playa como medida de protección para garantizar su uso principal, el turismo. La acreción observada está de acuerdo con las obras de recuperación y protección antrópica que se están llevando a cabo en la zona, así como con la protección que tienen debido a su localización próxima a la entrada de la Bahía de Guanabara. Los resultados concuerdan con los de (Muehe & Lins-de-Barros, 2016), que afirman que las playas de este sector han sido objeto de numerosas intervenciones, como vertidos, dragados y construcción de diques, debido a su ubicación en zonas urbanas muy modificadas. En Niteroi, un dique construido en la playa de Piratininga para protegerla de la erosión ha sido destruido y reconstruido en repetidas ocasiones. Sin embargo, a pesar de la presencia del muro, el perfil de la playa mantiene su posición y un volumen de sedimentos de aproximadamente 300 m³/m². Los hallazgos de este equipo de investigación también coinciden con los estudios de (Silva, *et al.*, 2009), que, mediante un análisis del perfil de las playas de la región en los últimos 30 años, han llegado a la conclusión de que, a pesar de la exposición de la línea de costa, no ha habido indicios de erosión. Según (Silva, 2006) la playa de Piratininga se caracteriza por el predominio de las olas originadas del S, con excepciones puntuales en las que predominan las olas del SO, las olas en picado y las olas en derrame. Estas características, como continúa Silva, dan lugar a perfiles con un fuerte ángulo de inclinación a lo largo del frente de playa, con una ligera variación en el perfil a lo largo de la playa. Además, los perfiles topográficos reflejan el comportamiento de las corrientes de deriva costeras, que influyen en el transporte

de sedimentos hacia el oeste durante el verano. Durante el invierno, el transporte de sedimentos se estrecha en los extremos del arco de playa, lo que provoca una reducción de la anchura de la playa hasta un máximo de +/- 80 m. Otros estudios, como los realizados por (Santos, *et al.*, 2004), (Bastos, 1994) y (Muehe, 1975), también demuestran una dinámica de playa similar. El análisis realizado por Santos *et al.* reveló una notable variación en la anchura media de la playa, con una diferencia de 15 m entre las mediciones de invierno y verano. Además, el estudio demostró que las corrientes de resaca desempeñan un papel importante en la destrucción del dique de la playa de Piratininga, observándose un impacto más pronunciado en el extremo oriental y un descenso gradual hacia el extremo occidental. Esta observación pone de relieve la influencia de las corrientes de resaca en la anchura de la playa, derivada de la erosión de la arena. (Bastos, 1994) observó que la playa de Piratininga presentaba un comportamiento dinámico diferenciado a lo largo de la playa. El sector oeste de la playa se mostró más dinámico, inestable y vulnerable a la acción de las mareas. Sin embargo, es importante señalar que Bastos realizó su estudio durante el invierno, una estación que puede haber influido en los resultados observados. Adicionalmente, la anchura de la playa presentaba una variación entre 17 y 55 m. Además, el estudio reveló que la playa estaba sufriendo un proceso erosivo durante el periodo de estudio, especialmente en el extremo occidental. Por último, los perfiles topográficos creados para el centro del arco de la playa por Muehe en 1974 demostraron que la anchura de la playa fluctuaba entre 47 y 62 m. Los resultados de las diversas investigaciones realizadas desde 1974 hasta 2005 (30 años) indicaron que los perfiles de la playa se han mantenido inalterados, lo que sugiere que es posible estimar que, si durante los últimos 30 años, la playa de Piratininga ha variado entre 40 y 80 m de anchura con una tendencia a la acreción, el resultado obtenido por este grupo de investigación en el período analizado de 150 años es acorde.

Zona III, también conocida como Seno de Jurujuba (Jurujuba Sound), figura 2.29, forma parte de la Región Praias da Baía. Se trata de una pequeña bahía que se encuentra al abrigo del promontorio de Jurujuba. El oleaje que afecta a la ensenada de Jurujuba procede principalmente de los cuadrantes sur y suroeste. Al norte, las playas de Boa Viagem, Flexas e Icaraí son más dinámicas, con una altura media de las olas de 0,50 m en condiciones normales y de 1,5 m en períodos de oleaje. Por el contrario, las playas de San Francisco y Charitas, situadas en el sur, son menos dinámicas, con una altura media de las olas de 0,30 m en condiciones normales y entre 0,50 y 0,70 m en períodos de resaca. La zona en cuestión cuenta con una

longitud de costa de aproximadamente 8.000 metros, con una morfología de playa predominante que puede describirse como una rampa, que presenta una ligera pendiente hacia el mar. Esta pendiente oscila entre 11 y 14 grados, con discretas variaciones estacionales que permiten observar pequeños acantilados en invierno, asociados a los picos de las playas. Al norte de la playa hay dunas de las que, en días de fuertes vientos, se desprende arena que puede llegar hasta el paseo marítimo. La arena presente en la playa de Charitas se caracteriza por su tamaño predominantemente fino (0,125 mm, entre 60-80%), con una proporción significativa de arena muy fina (0,062 mm). Además, la playa es conocida por albergar la aparición ocasional de bolas de lodo, que pueden encontrarse dispersas a lo largo de la playa hasta la zona de máximo alcance del oleaje tras la aparición de resacas. Los resultados obtenidos en esta zona indican una erosión neta de 1.37 km².

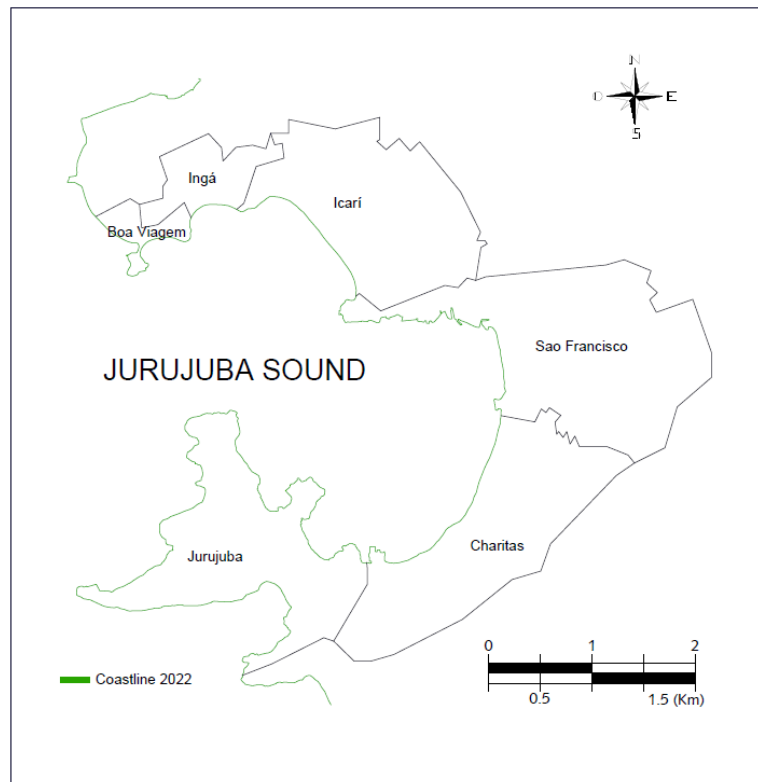


Figura 2.29: Región de las Playas de la Bahía (Região Praias da Baía).
Fuente: elaboración propia

El agua dulce entra en el Seno de Jurujuba (zona III) a través de varios pequeños canales que rodean la costa. Los ríos Cachoeira e Icaráí fueron clasificados como típicos ríos urbanos, mientras que los demás canales son alcantarillas abiertas en las que la descarga de líquidos se mantiene por flujos mixtos de efluentes domésticos y agua de lluvia. Es típico que estos canales sean altamente eficientes

en la remoción de sedimentos en suspensión durante la escorrentía pluvial, debido a sus perfiles transversales cóncavos suaves y poco profundos y a sus fuertes pendientes. La erosión obtenida por este grupo de investigación para esta zona, que asciende a 1,37 km², concuerda con investigaciones anteriores realizadas por (Baptista Neto, *et al.*, 1999) que también concluyen que, si bien los impactos de la urbanización moderna han sido graves, tanto en términos de elevada erosión como de contaminantes asociados, estos no son los únicos factores que han afectado al litoral, ya que se identificó una fase anterior de rápida sedimentación cerca de la costa, la cual parece correlacionarse con la deforestación del margen costero durante la primera etapa de la colonización europea. Así mismo, la composición y propiedades de los materiales que integran las pendientes desempeñan un papel crucial en la dinámica de erosión y la susceptibilidad a los deslizamientos en esta región. Factores como la resistencia, permeabilidad y cohesión de los materiales determinan su comportamiento ante los procesos erosivos y de inestabilidad de los taludes (Smyth & Royle, 2000). Los estudios de (Silva, 1999) evidencian una ligera tendencia a la disminución del tamaño de grano de la arena a lo largo del Seno Jurujuba. La subzona norte presenta arenas con granos más gruesos en comparación con las playas de Charitas y San Francisco, donde predominan granos más finos. Este patrón granulométrico puede atribuirse a los diferentes niveles de energía de las olas a lo largo del seno. Las áreas con mayor exposición a la acción del oleaje tienden a presentar arenas de granulometría más gruesa, mientras que las zonas más protegidas acumulan sedimentos de menor tamaño. Esta tendencia parece corresponderse con los procesos observados en esta zona por anteriores investigaciones y los resultados actuales de erosión de este grupo de investigación. Las playas están actualmente en equilibrio con la dinámica ambiental de la Bahía de Guanabara y el nivel del mar predominante. Los problemas existentes pueden atribuirse a una intervención humana inadecuada.

Zonas IV-V-VI Niteroi Norte se sitúa en el interior de la Bahía de Guanabara, donde la línea de costa está protegida de la influencia directa del Océano Atlántico. Los resultados de estas zonas suponen de nuevo una acreción correspondiente a 2.34 km², predominantemente como consecuencia de la formación de puertos, muelles y otras construcciones antropogénicas. La Zona IV, correspondiente a la Isla Conceição, se formó a partir de la conexión de dos islas previamente separadas por un canal navegable, dependiendo de la marea. Esta conexión se estableció mediante el relleno realizado durante la construcción del Puerto de Niterói, utilizando arena extraída del dragado del muelle. En 1958, se completó la conexión

entre la Isla Conceição y el continente. Por su parte, la Zona V, correspondiente a la Isla de Mocanguê, estaba inicialmente formada por dos islas adyacentes: Mocanguê Grande y Mocanguê Pequena. La isla mayor siempre estuvo bajo jurisdicción de La Marina, mientras que la menor albergó instalaciones de la Compañía Naviera Lloyd Brasileiro hasta 1973, cuando fue transferida a La Marina de Brasil. Finalmente, en 1986, se rellenó el canal que separaba las islas, se cerró la Estación Naval y se construyó la Base Naval de Río de Janeiro. Estos procesos de conexión y relleno de islas son ejemplos de la acción antrópica que ha transformado la geomorfología de la Bahía de Guanabara a lo largo del tiempo.

Según (Soares da Costa, 2022), la carretera marcada en rojo en el mapa del siglo XVIII (figura 2.30), que conectaba los actuales barrios de São Domingos e Ingá atravesando las colinas, difiere significativamente del trazado topográfico actual. En el siglo XVIII, este camino llegaba hasta la costa de Niterói, pero con la construcción de rellenos costeros en el siglo XX, ya no alcanza el mar por el lado de São Domingos. En 1840, el ingeniero militar francés Pedro Taulois elaboró un nuevo plan urbanístico para la ciudad de Niterói, cuya configuración espacial solo sufriría cambios de magnitud similar cien años después, durante el periodo republicano, con la construcción de vertederos (Pereira, 2021). Los dos estudios en conjunto con la documentación histórica de las islas Conceição, Mocangue, Viana y Santa Cruz, ya descritas en este trabajo, están alineados con los resultados de este grupo de investigación para la zona Niteroi Norte (Zonas IV-V-VI). El balance final de esta zona fue positivo, con una acreción de 2,34 km². Otra de las obras que generó acreción del litoral de Niteroi fue la construcción del Puente Rio-Niteroi, que tiene 4,04 km construidos en el terraplén (longitud total de 13,29 km), 50% de los cuales corresponden al lado este de la bahía.

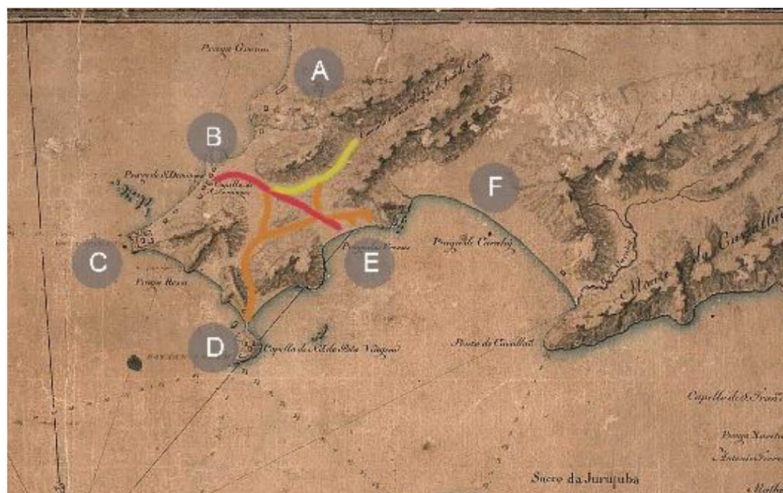




Figura 2.30: Mapa de los barrios de São Domingos, Boa Viagem e Ingá
Fuente: mapa de la Biblioteca Digital Nacional [cart209337] (2022) y mapa ESRI (2022).

El balance del resultado de las Zonas VII-VIII-IX en la Isla Flores, Isla Engenho, Isla dos Tavares y la sección continental frente a las islas es de acreción. Sin embargo, hay pequeños sectores de erosión. El terreno ganado al mar asciende a 1.49 km². El resultado puede atribuirse a las actuaciones antrópicas en los diferentes sectores, por ejemplo, la Isla das Flores ha experimentado múltiples transformaciones en el siglo XX, sirviendo como albergue, prisión y junto a otras islas, forma parte de la base de La Marina. En la zona continental, se realizaron vertederos y expropiaciones para la construcción de la autopista BR-101. Las playas de San Gonzalo presentan grandes signos de degradación y contaminación. La playa de Beira, en la isla de Itaoca, está degradada y muestra cambios morfológicos debido a las actividades industriales, que no son fácilmente recuperables debido a la distribución de arena gradual (48% grano medio / 41% muy gruesa), acompañada de una notable acumulación de grava. Los resultados de los análisis realizados por (Silva, *et al.*, 2016) indican la presencia de un patrón sedimentario bimodal, que también se observa en Praia da Luz, con origen de sedimentos atribuible a la Formación Caceribu. Por su parte, el borde noreste de la Praia da Luz destaca por la abundancia de manglares que, durante la bajamar de primavera, revela un sustrato fangoso con una considerable acumulación de residuos (Silva Amador, 1997). Las características de las playas de esta zona concuerdan exactamente con los resultados de la acreción costera obtenidos en este trabajo, y, por tanto, se pueden considerar en concordancia con la geomorfología de la costa obtenida en estudios anteriores, así como con la contribución de material generado por las obras de acreción ejecutadas históricamente.

Zona X, la isla Paquetá, está situada a mayor distancia de la zona continental que las demás islas evaluadas. Presenta zonas de erosión y acreción con un balance negativo de 0.13 km² de tierras perdidas. Hay zonas de erosión en el lado sur, donde las aguas se agitan por la tarde, cuando los vientos del sur cobran fuerza, mientras que las aguas de los lados este y oeste permanecen tranquilas. El lado norte de la isla ha tenido históricamente desarrollo agrícola, y muestra erosión posiblemente como resultado de los muelles en el lado noroeste que interceptaron el transporte de sedimentos y la salinidad del agua de la bahía en esta área disminuye a 9.0S en los meses de mayor precipitación, causando también una disminución de los manglares y estuarios.

Zonas XI y XII, que incluyen la Estación Ecológica Guanabara y el río Surui, presentan pequeñas áreas de acreción, siendo la erosión el proceso dominante que alcanzó 14,07 km². El balance final fue negativo en 12.30 km². Sin embargo, las dos zonas estudiadas están situadas en áreas protegidas que han sido objeto de análisis con vistas a prevenir catástrofes que puedan causar daños al medio natural. Por ejemplo, el derrame de petróleo en la parte noroeste de la bahía en el año 2000 que provocó la migración de petróleo hacia Suruí y Nova Orleans. Esto demostró que existe la posibilidad de que otros contaminantes liberados en la misma región también sean transportados a estas zonas de manglares en determinadas condiciones de marea. El análisis cuantitativo de la porción noreste de la Bahía de Guanabara presentado por (Fernandes, *et al.*, 2020), indica modificaciones significativas en el entorno del Área de Protección Ambiental de Guapimirim. El análisis se dividió en cuatro períodos: Entre 1938 y 1974, el litoral presentó una pérdida de 1,44 km² de superficie de agua. Esta evidencia se puede asociar a la degradación de la región, que se produjo como resultado de la deforestación para proporcionar recursos de acuerdo con los modelos económicos que estaban en vigor durante el período analizado (Silva Amador, 1997). En el segundo periodo del estudio realizado por Fernandes *et al.* entre 1974 y 1984, se sustrajo un total de 0,65 km² de la zona de protección designada. Sin embargo, en el tercer y cuarto periodo, los cambios en la línea costera no son perceptibles en la escala utilizada para la investigación de (Fernandes, *et al.*, 2020), lo que puede indicar una reducción de los impactos derivados de la presión de las actividades humanas sobre la masa de agua (Verdonschot, *et al.*, 2013). Según (Souza Moraes, *et al.*, 2009), la recuperación natural de los ecosistemas de manglar situados dentro de los límites del río Guapi puede asociarse a un mayor control de las acciones humanas debido a las políticas de vigilancia establecidas. Un ejemplo ilustrativo

de ese movimiento es la promulgación del Decreto N.º 90.225, del 25 de septiembre de 1984, que estableció el Área de Protección Ambiental de Guapimirim y la protección de sus manglares.

La deforestación, rectificación y canalización de algunos ríos que desembocan en la bahía, modificando su curso y caudal (Pires, 2010), han influido en la deposición de sedimentos alrededor de la cuenca de la Bahía de Guanabara (Godoy, *et al.*, 1998). Se observa que los manglares, que antes servían de filtros eficaces en las zonas entre mareas, se han agotado casi totalmente en las zonas donde antes eran abundantes (Silva Amador, 1997). La modificación completa de la parte noreste según (Fernandes, *et al.*, 2020) es aproximadamente 2.09 km². El área de erosión obtenida por Fernandes *et al.* es considerablemente inferior a los resultados de este trabajo. Sin embargo, es evidente que la discrepancia puede atribuirse a la menor duración del estudio, dado que esta investigación abarca casi un siglo más de análisis cartográfico. Otro factor crucial a tener en cuenta es el tipo de vegetación presente en estas zonas. Esta corresponde a los manglares que han sido directamente afectados por la contaminación y el mal uso por parte del ser humano.

La zona XIII Barao de Maua Municipal Natural Park (PNMBM) ha experimentado una erosión de 1.75 km². El área PNMBM ha mostrado signos de degradación, que se vieron agravados por el accidente del vertido de petróleo del año 2000. En respuesta, se puso en marcha el Proyecto Mangue Vivo, que dio lugar a la restauración de 90 ha, lo que representa más del 75% de la superficie total del parque. Así mismo, la desembocadura del río Iguaçu está incluida en el plan de descontaminación de la Bahía de Guanabara (PDBG), un proyecto de rehabilitación ambiental del gobierno del estado de Río de Janeiro financiado por el Banco Mundial. En esta área, se realizará dragado para recuperar condiciones razonables de circulación del agua y eliminar las capas más contaminadas de los sedimentos del fondo. Para comprender plenamente la importancia de estas regiones, es esencial reconocer la presencia de la refinería de Petrobras Duque de Caxias y un grupo de instalaciones petroquímicas en la margen izquierda del río Iguaçu, mientras que en la margen derecha se encuentra el mayor vertedero de residuos urbanos del área metropolitana de Río de Janeiro, el vertedero de Gramacho, que maneja aproximadamente 6.000 toneladas de residuos por día. Además, la mayoría de los ríos de la región que desembocan en la bahía se encuentran actualmente en un estado de grave deterioro (Barbosa & Soares de Almeida, 2001). Con respecto a la parte noroeste de la bahía, el bajo contenido de oxígeno superficial en el río Iguaçu está relacionado con los vertidos de

contaminantes existentes. En verano, los niveles de oxígeno en el fondo de las estaciones centrales y noreste de la bahía fueron extremadamente bajos (entre 0,12 y 0,3), lo que indica la presencia de una zona anóxica en esta región (Eichler, *et al.*, 2014). Investigaciones previas han demostrado de manera consistente que las actividades antropogénicas son responsables de la erosión observada en la zona XIII de este estudio.

Zonas XIV, XV, XVI, and XVII, Parque Sarapuí, Isla de Gobernador, Isla Fundación y Barrio Cajú, respectivamente, corresponden a la mayor área de acreción en este estudio, alcanzando un área total de 18.27 km² de terrenos ganados al mar. El área de acreción de estas zonas es el resultado de los rellenos ejecutados para la construcción del Aeropuerto Internacional de Galeão en la Isla del Gobernador, la construcción de la Universidad Federal de Río de Janeiro en la Isla Fundación y la formación y construcción del barrio de Cajú. El análisis multitemporal de la sección noroeste de la Bahía de Guanabara realizado por (Fernandes, *et al.*, 2020) indica que la sección noroeste de la Bahía de Guanabara ha experimentado diversos cambios en su línea de costa entre 1938 y 1997. Entre 1938 y 1974, se observó un movimiento de la línea de costa hacia la orilla, lo que resultó en la adición de áreas para puertos, la desaparición de la Playa María Angú y la incorporación de la Isla Ferreiros al continente. Entre 1974 y 1984, se produjo un movimiento en forma de media luna de la zona costera en el segmento que comienza en la base del puente Río-Niterói y se extiende hacia el suroeste, en dirección a la Isla Fundación. Esta zona, anteriormente inundada y compuesta por llanuras mareales, fue rellenada, y la Isla de Pinheiro pasó a formar parte del continente. De 1984 a 1997, la urbanización continuó provocando cambios en la zona costera. Los sucesivos desembalses en la zona norte del río Meriti establecieron un nuevo contorno de la línea de costa. Además, las elevadas tasas de sedimentación y degradación observadas en el canal deforestado entre la Isla Gobernador y el continente provocaron una pérdida de superficie de agua. A partir de los años setenta, el modelo económico vigente facilitó el uso continuado de los rellanos para grandes proyectos de ingeniería (Silva Amador, 1997). (Fernandes, *et al.*, 2020) también indica que entre 1997 y 2015, en comparación con los períodos anteriores, se observaron pocos cambios discernibles a escala. Por otra parte, el Canal de Fundación también está incluido en el PDBG, y las acciones emprendidas para este proyecto demuestran que la dinámica actual de la evolución de la Isla de Fundación (zona XVI) indica una recuperación del área de reserva ambiental, una

disminución del uso de vegetación herbácea y un aumento del área construida en algunas porciones de la isla.

Además, este estudio examinó el impacto de la construcción del Aeropuerto Internacional en la geomorfología de la Isla del Gobernador (figura 2.31). Como resultado de esta construcción, la isla (zona XI) experimentó cambios significativos en su contorno, con la adición de nuevas áreas y un perímetro más amplio en el lado noroeste. Los cambios en la región noroeste (zonas de XIII a XVI), delineados por (Fernandes, *et al.*, 2020), abarcaron un área de aproximadamente 14,78 km², lo que concuerda con el área de 18,27 km² obtenida en esta investigación, y que considera aproximadamente 100 años más de evaluación.

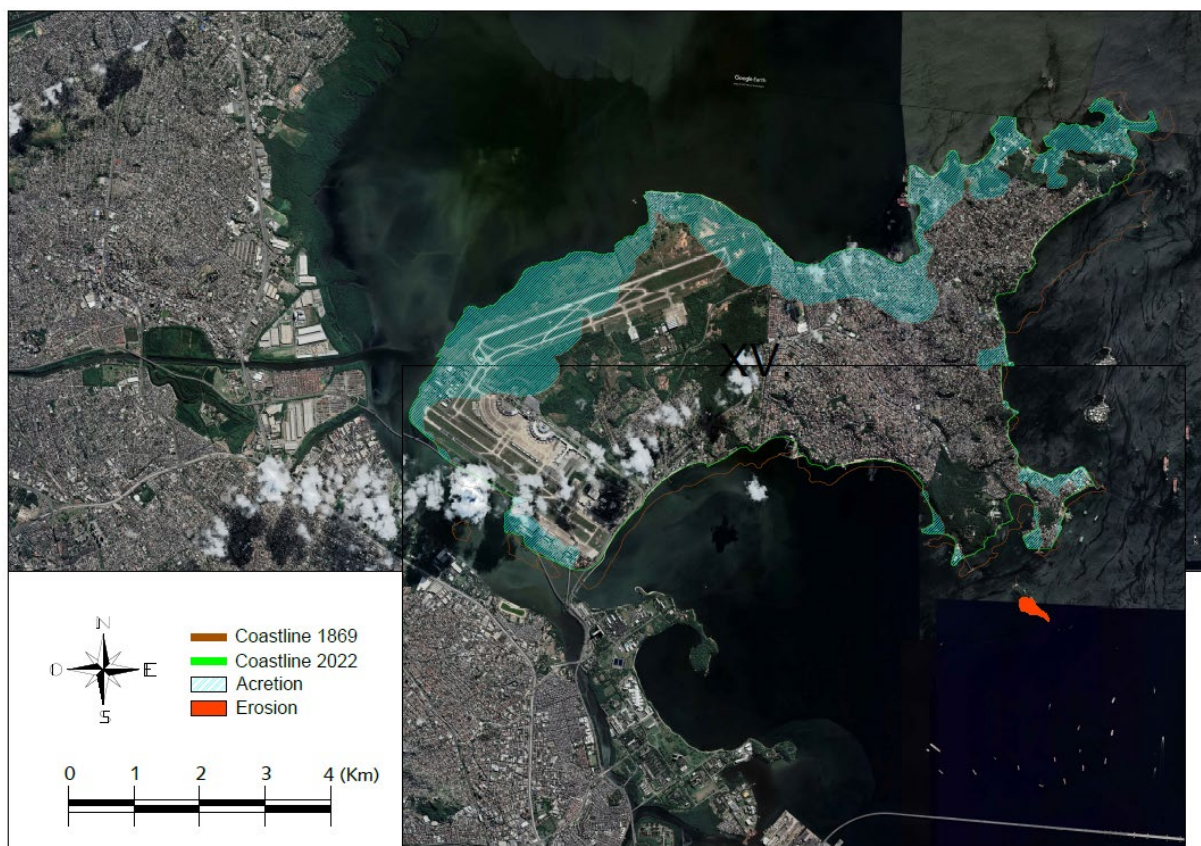


Figura 2.31: Acreción Isla de Gobernador por obra Aeropuerto
Fuente: elaboración propia sobre fotografía aérea Google Maps 2022

El estudio de esta investigación concluye con un análisis de las siguientes zonas: XVIII a XXII, el Puerto de Brasco, el Centro de la Ciudad, el Aeropuerto Santos Dumont, la Fortaleza de Sant Joao y la Playa de Copacabana, que se sitúan en la parte sudeste de la bahía. El área total de acreción de estas zonas es de 7.34 km², dando lugar a un balance positivo. Una vez más, la construcción de fortalezas, aeropuertos y puertos navales, así como la aportación continua de arena para la

formación y el mantenimiento de las playas, son los principales factores antropogénicos responsables de los resultados observados en estas zonas.

El litoral de las zonas del XVII al XXI (figura 2.32), situado entre el actual centro de la ciudad y la ensenada de Botafogo, incluido el barrio de Cajú, sufrió importantes alteraciones a principios del siglo XX. Algunas de las playas se perdieron debido a la recuperación de tierras, mientras que otras sufrieron amplias modificaciones en sus contornos. Los temporales marítimos y los daños observados en algunas playas, como Saúde (Gerson, 2000) y en la orilla de la playa de Gloria, incentivaron obras en el litoral (Lins-de-Barros, *et al.*, 2019). Las acciones de otras entidades contribuyen a las áreas de acreción en las zonas, incluyendo el Parque de Flamengo. Este parque fue construido en terrenos ganados al mar y consiste en una red de espacios públicos que se extiende a lo largo de la costa de la Bahía de Guanabara, desde el Aeropuerto Santos Dumont hasta la Bahía de Botafogo (1,3 km²). Este borde construido está separado de la ciudad por una vía rápida para el tráfico rodado, aislada acústicamente por las elevaciones del propio terreno. Además, el Museo de Arte Contemporáneo de São Paulo se construyó en una parcela de 0,4 km² concedida en 1951. Esta parcela está situada en el atrio de Flamengo, junto a la avenida Beira Mar, en el centro de la ciudad. Para facilitar la construcción del museo y sus espacios adyacentes, también se excavó la colina de las inmediaciones (Rey Pérez, 2012). El área de acreción determinada por (Lins-de-Barros, *et al.*, 2019) se comparó con los resultados de (Rey Pérez, 2012) y con los resultados de esta investigación. Se constató que había concordancia entre los tres valores.

Por último, la playa de Copacabana (Zona XXII) presenta una acreción derivada de diversas fuentes, incluida la continua afluencia de materiales recibidos a lo largo del tiempo. Por ejemplo, durante el gobierno de Pereira Passos, se obtuvo una franja de tierra ganada al mar para la construcción de la Avenida Atlántica, que mide 4,5 km de longitud y está situada entre los fuertes de Leme y Copacabana. Como resultado, la avenida pasó de dos a ocho carriles, se añadieron tres nuevas aceras (de 28, 14 y 10 metros de ancho) y la playa de Copacabana alcanzó una anchura de 80 metros (Rey Pérez, 2012). El área de acreción resultante de los datos de Rey corrobora aún más que los resultados del presente estudio reflejan con exactitud el comportamiento del cambio de la línea de costa en esta zona.

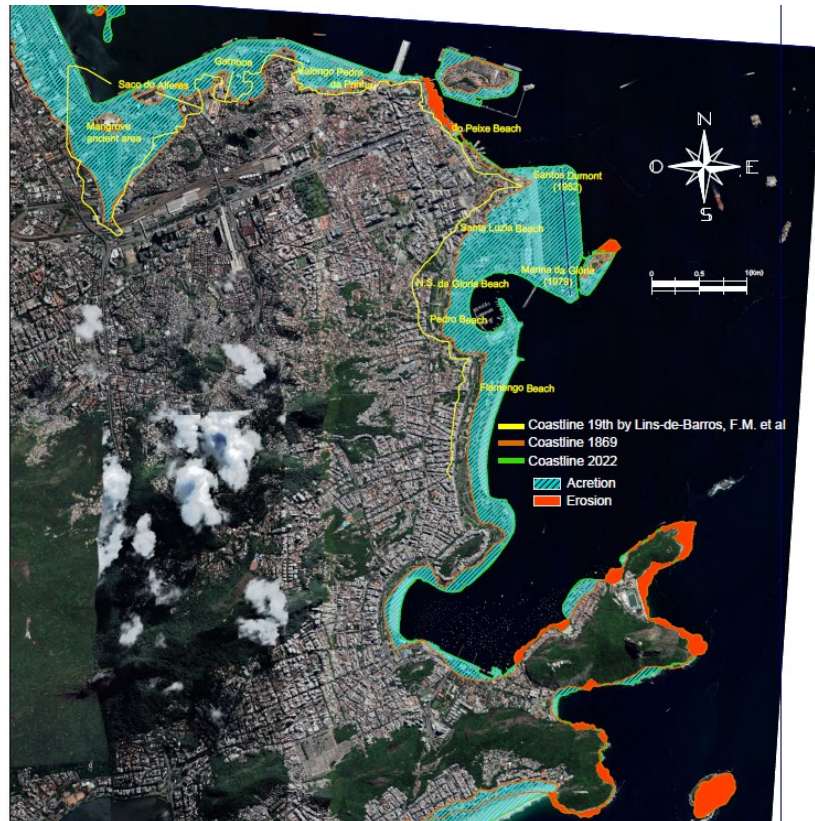


Figura 2.32: Cambios del litoral de las zonas del XVII al XXI

Fuente: Lins-de-Barros, F.M. *et al.* y elaboración propia sobre fotografía aérea Google Maps 2022

2.5. Nueva Orleans, EEUU

El tercer caso de estudio analiza la línea de costa interior del Lago Pontchartrain, que incluye la ciudad de Nueva Orleans (New Orleans), al sur.

Nueva Orleans está ubicada en el delta del río Mississippi al sureste de Luisiana, aproximadamente a 29.9511° N y 90.0715° W (figura 2.33), en la confluencia del río Mississippi y el lago Pontchartrain, está distanciada aproximadamente 177 km (110 millas) del Golfo de México. Esta ubicación expone a la ciudad a huracanes y tormentas frecuentemente cuyos vientos predominantes vienen del sureste. Las ráfagas extremadamente fuertes de vientos que se presentan durante la temporada de huracanes, entre junio y noviembre, afectan de la misma forma al oleaje que puede alcanzar alturas significativas contribuyendo a la erosión costera y a las inundaciones. La ciudad se encuentra construida sobre una serie de antiguos canales y lóbulos deltaicos que forman un terreno relativamente plano y bajo, con elevaciones que oscilan entre 0 y 6 metros sobre el nivel del mar según (Saucier, 1994). Sin embargo, estudios más recientes realizados por (Dixon, *et al.*, 2006) indican que Nueva Orleans experimentó una rápida subsidencia en los tres

años previos al paso del Huracán Katrina (agosto de 2005), y en particular, el este de la ciudad presenta las tasas de subsidencia más altas históricamente en el sur de Luisiana, con una topografía de entre 3 a 5 metros por debajo del nivel del mar.

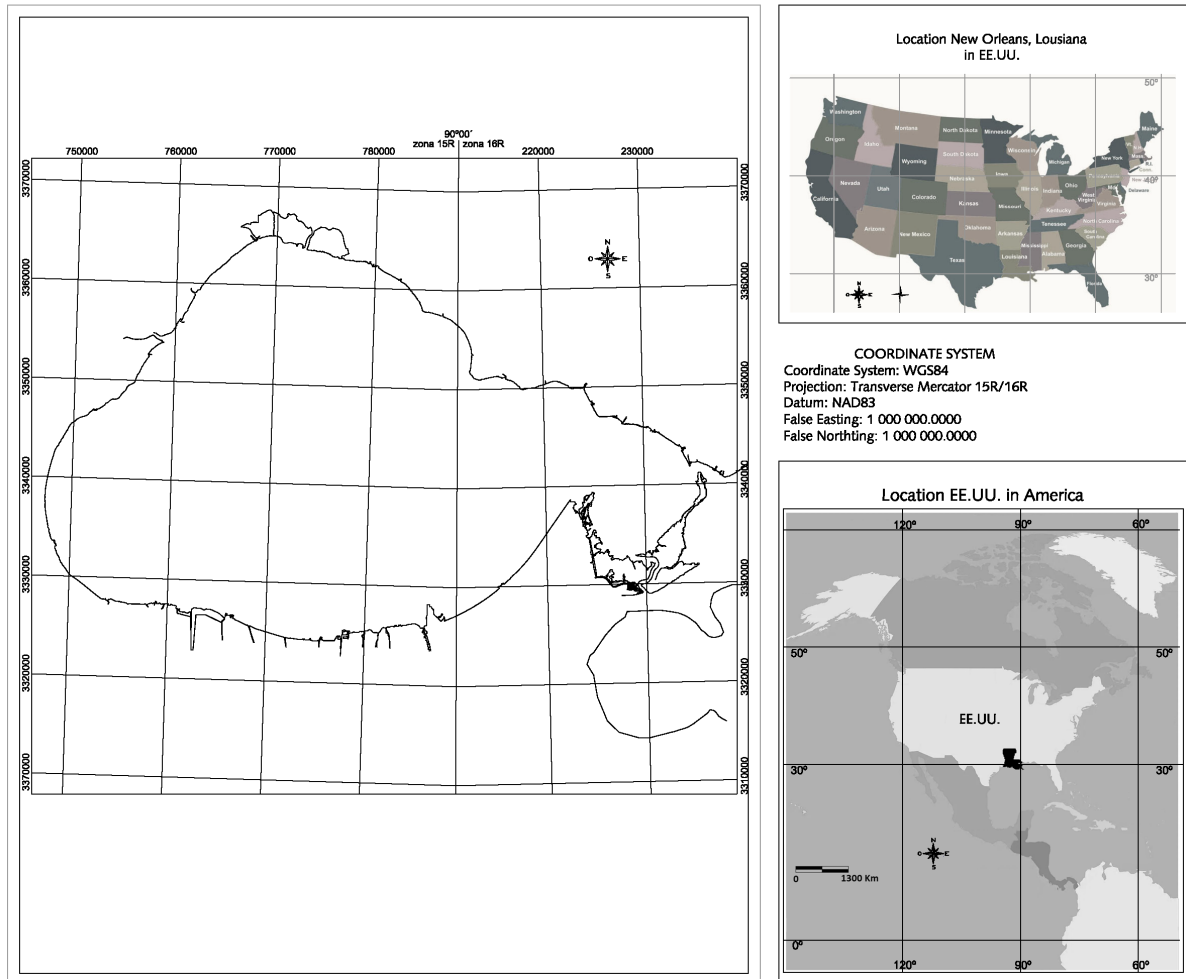


Figura 2.33: Localización de Nueva Orleans
Fuente: Elaboración propia

La ciudad de Nueva Orleans fue fundada en 1718 por Jean-Baptiste Le Moyne de Bienville con el nombre de La Nouvelle-Orléans como parte del distrito administrativo del virreinato de Nueva Francia en América. Rápidamente fue designada capital del distrito en 1722, debido a su propicia situación geográfica en la confluencia del río Mississippi y el mar Caribe. Esta ubicación facilitó el comercio y permitió establecer una sólida defensa militar. Antes de la colonización europea, la zona estaba habitada por diversas tribus de nativos americanos, como los Chitimacha, los Choctaw y los Natchez. Estas tribus pudieron prosperar en el abundante ecosistema de la región gracias a la pesca, la caza y la agricultura. En 1763, tras el Tratado de París, Francia cedió a España su derecho sobre Nueva

Orleans y el resto de Luisiana al oeste del río Mississippi. El dominio español introdujo nuevos estilos arquitectónicos y marcos legales que dejaron un impacto duradero en la cultura y las infraestructuras de la ciudad (Colten, 2005). En 1800, el Tercer Tratado de San Ildefonso estableció un intercambio territorial entre España y Francia. España acordó renunciar a su territorio norteamericano de Luisiana a cambio de territorios en Italia. El tratado entró en vigor en 1801, devolviendo así la posesión francesa a la zona (Beerman, 2000). Sin embargo, en 1803 Estados Unidos compró a Francia el territorio Luisiana incluida la ciudad portuaria de Nueva Orleans, lo que incrementó casi al doble el tamaño del país norteamericano, aseguró el control sobre el río Mississippi, mejoró la situación económica y facilitó la expansión territorial del país permitiéndole unir del este al oeste.

Es importante aclarar que el término “bayou” viene de la voz *choctaw bayuk* que significa arroyo o río pequeño, e históricamente se ha utilizado en Luisiana como el término geográfico para designar una masa de agua formada por antiguos brazos y meandros del río Mississippi.

La figura 2.34 corresponde con una sección del mapa del siglo XVIII que muestra el lago Pontchartrain, Bayou St. John y otros bayous prominentes, en relación con el Barrio Francés y el asentamiento colonial de Nueva Orleans. Bayou Road va desde el Barrio John (F. Saucier, Carte Particulie're du Cours du Fleuve St. Louis, 1749).



Figura 2.34: Mapa del siglo XVIII lago Pontchartrain, Bayou St. John y otros
Fuente: (deFrance, *et al.*, 2019)

Socialmente durante el siglo XX la mezcla de las diversas culturas que convivieron en la ciudad, francesa, española, africana y estadounidense, generó una evolución cultural, económica y paisajística. Por ejemplo, a comienzos del siglo se propició en el corazón de la ciudad el nacimiento de un nuevo género musical que ha impactado la historia de la música, el *jazz*, mientras que simultáneamente la población se enfrentaba a la segregación racial y las disparidades económicas. Hacia la mitad del siglo el Movimiento por los Derechos Civiles trajo consigo reformas legales y sociales, mientras que en términos económicos los cambios fueron originados por la revolución industrial. A finales del siglo, a pesar de continuar con algunos problemas económicos y de infraestructura, Nueva Orleans aprovechó su patrimonio cultural para convertirse en un importante destino turístico atrayendo a millones de visitantes que asistieron a festivales como el Mardi Gras y el Nueva Orleans Jazz & Heritage Festival (Blasco, 2014).

2.5.1. Condiciones climáticas, físicas y geomorfológicas

El área de estudio tiene un clima subtropical húmedo, con masas de aire tropical dominando el clima durante la primavera y el verano, y el paso de frentes fríos continentales causando cambios sustanciales de temperatura durante el otoño y el invierno. El clima está influenciado por las numerosas superficies de agua como los lagos, arroyos y el Golfo de México. La precipitación generalmente es alta en dos períodos lluviosos bien definidos: lluvias de verano (junio- septiembre) y lluvias intensas de invierno (diciembre-marzo), con un promedio de precipitación de 119 días/año. La temperatura promedio anual es de 21°C, con temperaturas máximas promedio de 25°C y mínimas promedio de 17°C (U.S. Army Corps of Engineers, 2021).

La vegetación en Nueva Orleans y el Lago Pontchartrain incluye marismas, pantanos y áreas de bosque de ciprés calvo. Estas áreas proporcionan importantes hábitats para la vida silvestre y actúan como amortiguadores naturales contra las inundaciones. Con el paso del tiempo, el desarrollo urbano ha afectado la hidrología y la subsidencia de la zona. En la primera década del siglo XIX Nueva Orleans estaba cubierta principalmente por pantanos de ciprés. En las décadas siguientes, la tala de cipreses y la construcción de canales para el transporte de madera causaron el drenaje de las aguas subterráneas y la intrusión de agua salada. Entre 1891 y 1939, los pantanos de ciprés habían desaparecido casi por completo y comenzaron a aparecer signos de subsidencia. Para 1979, la mayor parte del área estaba urbanizada (Van Asselen, *et al.*, 2023).

Para (Törnqvist, *et al.*, 2008) la combinación entre la altitud (región baja) y la localización geográfica ocasionan que la ciudad sea muy vulnerable a los efectos del cambio climático y el aumento del nivel del mar, lo cual plantea retos significativos en términos de gestión ambiental y adaptación a los cambios climáticos. La investigación de (Burkett, *et al.*, 2003) presenta datos de altitud del terreno recopilados en las áreas con diques de la región metropolitana de Nueva Orleans entre 1951 y 1995, que muestran una subsidencia media anual de 5 milímetros por año, y concluye que la llanura deltaica del río Mississippi es particularmente vulnerable a la erosión y la inundación debido al rápido deterioro de las barreras costeras y las altas tasas de subsidencia del terreno. El hundimiento del suelo (subsidencia) se debe tanto a procesos naturales como antropogénicos y tiene un impacto directo en la dinámica del agua, los sedimentos, los nutrientes y la vegetación y, por tanto, en las condiciones límite del funcionamiento de los ecosistemas. Estos impactos no sólo afectan a la habitabilidad de los deltas, sino que también reducen potencialmente la capacidad de un delta para adaptarse y recuperarse de las fuerzas de cambio externas e internas. Si se traspasan los umbrales, un sistema deltaico puede colapsarse, perdiendo así sus valiosos servicios (Stouthamer, *et al.*, 2015).

La evolución paleogeográfica del área de estudio muestra la formación del delta del Mississippi a lo largo del tiempo. Según (Flocks, *et al.*, 2009) el Lago Pontchartrain es un gran estuario de barrera poco profundo, con una evolución geológica reciente que se remonta al Pleistoceno con la formación de una serie de terrazas a través de múltiples ciclos glaciales; hace aproximadamente 18.000 años, cuando el nivel del mar era más bajo, los ríos incidieron en estas terrazas y transportaron sedimentos hasta el borde de la plataforma continental; hace aproximadamente 4.000 años, la progradación del delta de St. Bernard a lo largo del margen sur de la cuenca de Pontchartrain cerró la ensenada y formó el lago Pontchartrain como se conoce actualmente. Por su parte, (Van Asselen, *et al.*, 2023) expone que hace aproximadamente 5000 años, el centro de deposición del delta se ubicaba al oeste del delta moderno; alrededor de 3800 años atrás una gran avulsión del río Mississippi creó un nuevo curso que encerró la antigua bahía, formando el lago Pontchartrain; posteriormente, hace unos 2500 años, el canal distributivo de Metairie-Gentilly se activó, aportando sedimentos fluvio-deltaicos a la zona, para finalmente, hace aproximadamente 1000 años, establecer el curso actual del río Mississippi. Este proceso de evolución paleogeográfica dio lugar al desarrollo de diferentes ambientes sedimentarios, como canales distributarios, pantanos de

ciprés y barreras de arena, y, por tanto, la ciudad de Nueva Orleans se encuentra sobre un lecho de sedimentos fluviales que consisten principalmente en arcilla, limo y arena.

Un estudio realizado por (U.S. Army Corps of Engineers, 2021) indica que la salinidad en el estuario del Lago Pontchartrain varía de 0.5 a 15 partes por mil, y que históricamente, la vegetación acuática sumergida (SAV) era abundante en todas las orillas del Lago Pontchartrain, sin embargo, la modificación de las orillas, el aumento de la turbidez del agua y el crecimiento excesivo de algas ocasionó la disminución del área total de SAV aproximadamente un 90% entre 1954 y 1998. Aunque el fenómeno de La Niña entre 1998 y 2001 aumentó las densidades de SAV al 80% respecto del nivel de 1953, los declives de SAV que ocurrieron después de la sequía y los huracanes Katrina y otros huracanes entre 2005 y 2012 causaron daños extensos a la SAV del Lago Pontchartrain. En 2016, la cobertura era de aproximadamente el 10% del nivel de 1953.

La circulación en el Lago Pontchartrain está controlada tanto por las olas generadas por el viento como por los flujos de agua dulce y las mareas. Los vientos generan corrientes de fondo que exceden 10 cm/s, produciendo concentraciones de sedimentos en suspensión superiores a 100 mg/L. El agua se mueve de oeste a este a través del lago y hacia el Seno del Mississippi (Mississippi Sound) durante eventos de inundación, mientras que las fluctuaciones de nivel del mar a través de los pasos estrechos causan fuertes corrientes de marea en la parte este del lago. Este sistema de circulación crea un patrón de dos giros en el centro del lago, con las corrientes más fuertes a lo largo de las orillas y corrientes más débiles en el centro. Este complejo patrón de circulación lleva a la resuspensión de sedimentos durante eventos de alta energía, aumentando la turbidez del agua (Flocks, *et al.*, 2009).

2.5.2. Transformación del paisaje costero

NUEVA ORLEANS

Aproximadamente el 60% del área urbana de Nueva Orleans se encuentra por debajo del nivel medio del mar, según (Van Asselen, *et al.*, 2023) la elevación más baja medida en los perfiles transversales es de aproximadamente -1.4 m MSL, esta situación, ya expuesta por otros estudios, permite entender porque desde su fundación ha sido necesaria la construcción de obras de ingeniería que protejan la

ciudad, y la zona, de posibles inundaciones ocasionadas por las crecidas del río Mississippi (abril - agosto) y/o por la temporada de huracanes (junio - octubre).

Durante la colonización francesa (1718-1763), los primeros esfuerzos para proteger Nueva Orleans de las inundaciones y mejorar la navegación incluyeron la construcción de diques a lo largo del río Mississippi. Los franceses aprovecharon los diques naturales formados por sedimentos depositados por inundaciones anuales y los reforzaron con tierra y arcilla adicionales. En 1728 y 1743, las autoridades coloniales francesas promulgaron leyes que obligaban a los propietarios rurales a construir y mantener sus propios diques, mientras que los diques en áreas urbanas eran construidos y mantenidos mediante una asociación público-privada con la Compañía de las Indias. Cuando Nueva Orleans pasó a manos de los españoles (1763-1800), las políticas de construcción y mantenimiento de diques permanecieron similares a las de los franceses. Los propietarios de tierras rurales continuaron siendo responsables de sus propios diques, y aunque los diques se hicieron más extensos, su calidad era a menudo deficiente, lo que resultaba en inundaciones frecuentes. En este período, se construyó el Canal Carondelet en 1795 para mejorar el drenaje, aunque su efectividad fue limitada y rápidamente se obstruyó. Con la adquisición de Luisiana por Estados Unidos en 1803, la responsabilidad del manejo de los diques pasó a los gobiernos locales. En 1807, los diques se convirtieron en responsabilidad de las parroquias (término oficial para la división civil primaria de Luisiana, en inglés Parish), pero la ciudad de Nueva Orleans continuó manteniendo su propia estructura de diques municipales. Las autoridades locales comenzaron a regular e inspeccionar los diques privados dentro de la parroquia de Orleans, extendiendo su control para proteger mejor la ciudad de las inundaciones. Durante el siglo XIX, Nueva Orleans experimentó una serie de cambios administrativos que afectaron la gestión de sus diques. En 1836, debido a tensiones étnicas y políticas, la ciudad se dividió en tres municipios, cada uno con su propia administración de diques, lo que resultó en una gestión inconsistente y variable (Campanella, 2002).

Así mismo, durante la época colonial fueron construidos tanto por franceses como españoles diversos fuertes para proteger la ciudad de ataques, tanto por tierra como por agua, siendo los más importantes:

- **Fort St. John (Fuerte San Juan del Bayou):** construcción original francesa alrededor de 1701, ubicado en la orilla del Lago Pontchartrain con el objetivo principal de proteger el acceso a la ciudad a través del Bayou St. John, una ruta de agua crucial que conectaba el lago con el Mississippi. En 1779 fue

reconstruido por los españoles, actualmente los restos del fuerte son visibles en el área conocida como Spanish Fort, parque histórico en Nueva Orleans.

- **Fort St. Charles (Fuerte San Carlos):** construido por los franceses en 1792 bajo el mando de Gobernador Francisco Luis Héctor de Carondelet, se localizaba cerca del río Mississippi, protegiendo el acceso fluvial a la ciudad jugó un papel crucial durante las guerras napoleónicas. Durante la administración española, se reforzaron las defensas y se ampliaron las instalaciones. Fue abandonado y desmantelado y hoy no queda mucho del sitio original.

La figura 2.35 muestra el Fort St. Charles, y corresponde con la ilustración del general V. Callot, antiguo militar francés y gobernador de Guadalupe. Pertenece a las Colecciones del Museo del Estado de Luisiana. Grabado por Jean Baptiste Pierre Tardieu, y fechado de 1796.

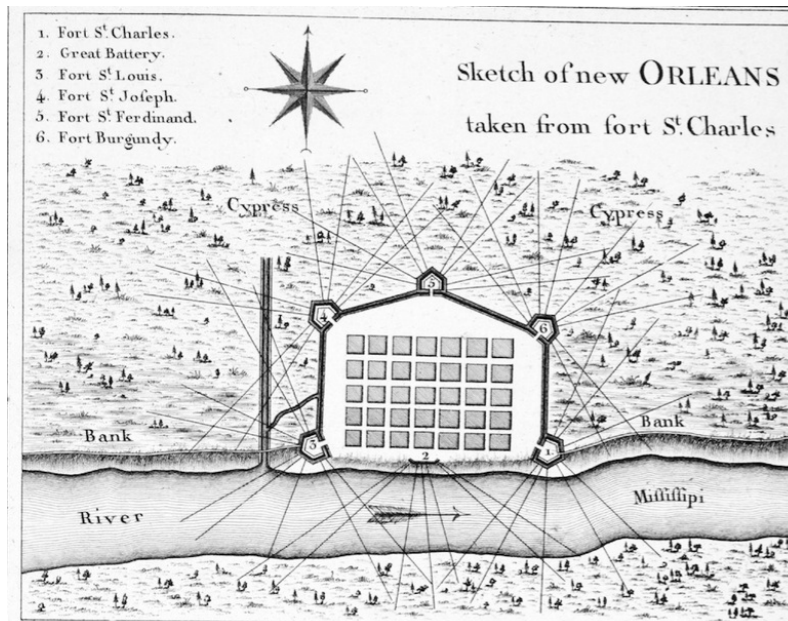


Figura 2.35: Fuerte San Carlos, 1796
Fuente: (Walker, 1856)

- **Fort Macomb (Fuerte Chef Menteur):** Originalmente fortificado por los españoles en 1793, estaba situado cerca del Chef Menteur Pass, al este de Nueva Orleans. Fue reconstruido y mejorado por los estadounidenses en 1822 después de la compra de Luisiana. Su función principal era proteger la entrada oriental a la ciudad, controlando una ruta estratégica para cualquier invasión potencial. Actualmente está en ruinas y cerrado al público, aunque conserva su estatus de sitio histórico importante.
- **Fort St. Philip (Fuerte San Felipe):** Construido por los franceses en 1792 en el área de Plaquemines Parish, cerca del río Mississippi, río abajo de Nueva

Orleans, tuvo un papel crítico en la defensa de la ciudad durante la Batalla de Nueva Orleans en 1815. También fue clave durante la Guerra de Secesión. Este fuerte también está en ruinas, pero permanece como un hito histórico de difícil acceso debido a su ubicación remota.

Estos fuertes fueron esenciales para proteger Nueva Orleans de ataques y para mantener el control sobre las rutas estratégicas de navegación y comercio. La construcción y mejora de estas fortificaciones reflejaron las preocupaciones defensivas y estratégicas de las potencias coloniales que controlaban la región (figura 2.36).

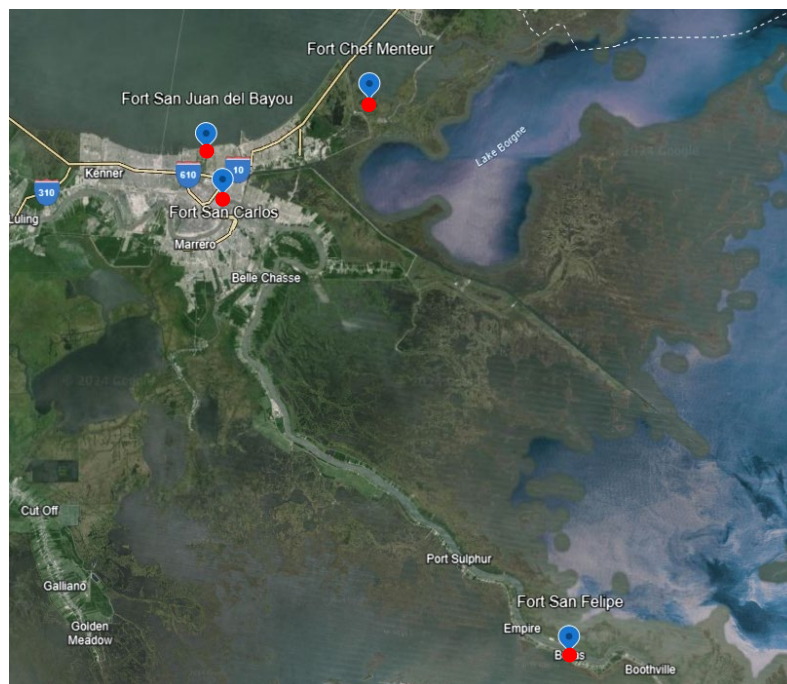


Figura 2.36: Localización de los cuatro fuertes, Nueva Orleans
Fuente: Google Earth

Los pantanos que delimitan la parte norte de Nueva Orleans se denominaban «back swamps» (pantanos traseros) en los mapas más antiguos y «cypress swamps» (pantanos de cipreses) en los mapas elaborados después de 1816. La figura 2.37 es una extracción de la zona de Nueva Orleans, tomada de la Carte de la Louisiane et du cours du Mississippi, publicada en París en 1718, muestra la desembocadura del río Mississippi en el Mar Caribe según la percepción de Guillaume de L'Isle en el periodo comprendido entre 1675-1726. La imagen permite evidenciar la importancia del río Mississippi y el enclave de puerto natural que conforma el lago de agua salada denominado Pontchartrain.



Figura 2.37: Desembocadura del río Mississippi en el Mar Caribe
Fuente: (L'Isle, 1718)

A principios del siglo XIX, Nueva Orleans se convirtió en un importante centro del comercio del algodón y el azúcar, así como de la explotación de la mano de obra esclava africana que ingresaba a Norteamérica por el puerto y se transportaba hacia el interior a través del río Mississippi. El tejido social de la ciudad se hilaba entonces tanto por la clase terrateniente rica que surgía como por población diversa que confluía en la ciudad y que incluía a personas libres de color, mestizos americanos y europeos (Martinez, 1951). El puerto de la ciudad vio incrementada las obras de adecuación y remodelación durante la época de los barcos de vapor (posterior a 1815) debido, precisamente, al incremento de la importancia de la ciudad-puerto como principal centro de transbordo del comercio fluvial-marítimo en donde se originó uno de los mayores puertos para el comercio de esclavos. En 1875 era el noveno puerto estadounidense, con un tráfico de 6.350 toneladas anuales. Tras la finalización de los diques del río Mississippi en 1879, se convirtió en un puerto de aguas profundas durante todo el año y experimentó un aumento de 65 veces en el comercio marítimo, aumentando a 410.000 t anuales, sólo superado por Nueva York, conservando esta posición hasta mucho después de la Segunda Guerra Mundial. Desde finales del siglo XX y hasta nuestros tiempos sigue siendo el puerto más activo del país para mercancías a granel, como trigo, arroz, maíz, soja y cemento (Rogers, 2008).

Durante la Guerra Civil estadounidense, y debido a su importancia económica y militar, Nueva Orleans se convirtió en un objetivo estratégico. En abril de 1862, las fuerzas de la Unión capturaron la ciudad, que permaneció bajo su control durante el resto de la guerra lo que la mantuvo protegida de la destrucción

generalizada que afectó a muchas otras ciudades del Sur. Posteriormente, inicia la denominada época de la Reconstrucción, periodo de gran agitación social y política de la ciudad durante la cual los esfuerzos por reconstruir e integrar en la sociedad a los antiguos esclavos encontraron una considerable resistencia y violencia que sólo se vio disminuida con el Compromiso de 1877, que puso fin a la Reconstrucción y dio paso a la era de las Leyes Jim Crow (Foner, 1988).

La figura 2.38 denominada “Habitation de l'auteur sur le fleuve”, corresponde con el mapa de la plantación del oficial del ejército francés Dumont de Montigny en el lado este del río Mississippi, tal y como se veía hacia 1730. La plantación se estableció a unas diez leguas río abajo de Nueva Orleans, en un lugar que más tarde formaría parte de la parroquia de Plaquemines. Identifica la casa principal, los edificios anexos, las dependencias de los esclavos, los campos cultivados y el jardín. Obtenido de las memorias manuscritas de Dumont de 1747 sobre sus experiencias en Luisiana entre 1715-1737.

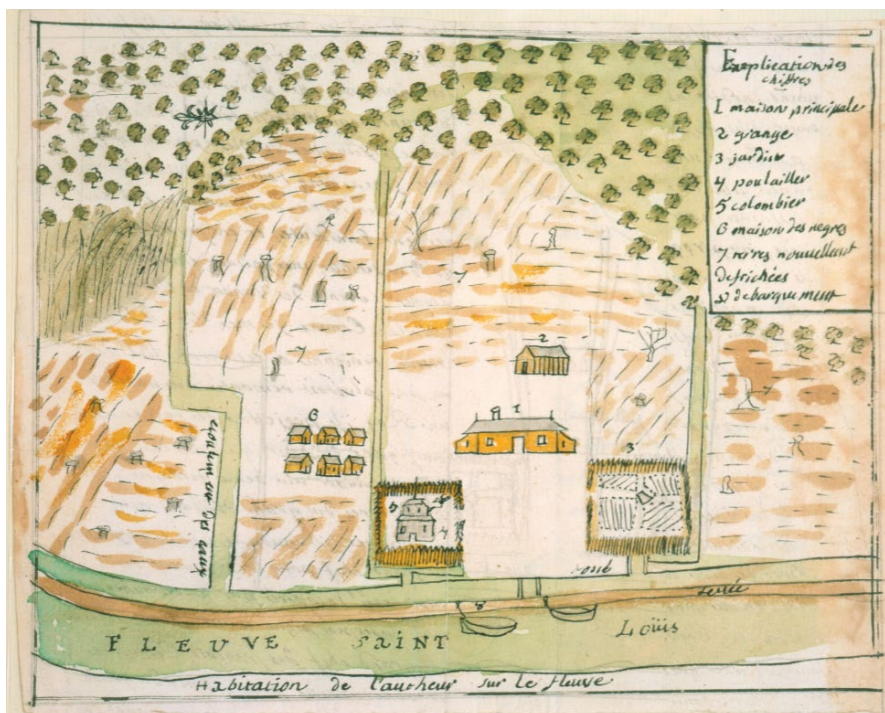


Figura 2.38: Habitation de l'auteur sur le fleuve
Fuente: (deFrance, et al., 2019)

Nueva Orleans siempre ha sido una ciudad de alto mantenimiento para el drenaje. El distrito residencial de la ciudad se mantuvo aislado del antiguo montículo del dique del río Mississippi hasta después de 1895, cuando se iniciaron serios intentos de reforzar el «dique trasero» del lago Pontchartrain y establecer un sistema de drenaje significativo. La mayor parte de las tierras bajas pantanosas de cipreses

entre Mid-City y el lago Pontchartrain se subdividieron entre 1900 y 1920, después de que la ciudad empezara a construir un sistema de drenaje integral. El drenaje de los antiguos pantanos desencadenó un boom inmobiliario que supuso un aumento del 700% en la superficie urbana de la ciudad y del 80% en las tasaciones durante el mismo periodo (Campanella, 2002). La mayoría de estas tierras bajas no se urbanizaron hasta después de la I Guerra Mundial. Otras 728 hectáreas se ganaron a la orilla sur del lago Pontchartrain en 1928-1931 y el resto de las tierras bajas se urbanizaron después de la II Guerra Mundial, entre 1946 y 1975.

Entre 1833 y 1878, se excavaron aproximadamente 58 km de canales de drenaje a través de la pendiente posterior de los diques naturales y las depresiones de los pantanos que bordeaban el Lago Pontchartrain, con el objetivo de drenar las partes más bajas de la ciudad y prevenir brotes de fiebre amarilla, así como parte del desarrollo del sistema de protección contra inundaciones que rodeaba a la ciudad sobre los que ejecutaron varias obras de ingeniería clave a lo largo de los siglos. Los primeros trabajos de drenaje buscaban elevar los diques naturales del río Mississippi y excavar canales de drenaje que conducían hacia Bayou St. John, como único punto natural de ruptura a través de la cresta distributaria de Metairie-Gentilly.

El Bayou Saint John, originalmente era un canal distribuidor del río Mississippi que llevaba agua a través de los pantanos de cipreses hasta el lago Pontchartrain, ofreciendo una ruta prácticamente directa desde el río hasta el lago y viceversa. Luego, en los primeros años del siglo XIX, el curso del arroyo se amplió con la construcción del canal de Carondelet y su cuenca de maniobra, pero esas estructuras se rellenaron a principios del siglo XX porque cayeron en desuso. El Bayou Saint John todavía está conectado al lago Pontchartrain, pero debido al hundimiento ya no transporta agua fuera de Nueva Orleans (Wolff, *et al.*, 2021).

El canal de la calle 17 es una vía fluvial construida que se ha convertido en la salida más grande del sistema de drenaje de Nueva Orleans que, además, es el límite jurisdiccional que divide la parroquia de Orleans de la parroquia de Jefferson. Los trabajos de excavación y relleno más importantes que se han ejecutado en el canal, antes del huracán Katrina, corresponden con la excavación original de los diversos canales que fueron conectados entre 1833-1878, las labores de recuperación y mantenimiento después del Huracán Grand Isle de 1915, y después del huracán de octubre de 1947. Estos rellenos se hicieron para elevar y reforzar los diques y muros de contención a lo largo del canal en respuesta a las inundaciones causadas por los huracanes mencionados que afectaron la zona. La figura 2.39 es un mapa

generalizado de los principales desagües y barrios de Nueva Orleans. El sistema de canales de drenaje se ha ampliado y ajustado durante más de 200 años. Las líneas paralelas indican la ubicación de las carreteras interestatales 10 y 610 a través de la ciudad. Obsérvese cómo parte de la I-10 sigue el New Basin Canal.

En 1927 el Cuerpo de Ingenieros del Ejército asumió un papel de liderazgo en la provisión de infraestructura de control de inundaciones, supervisando el Proyecto del Río Mississippi y Afluentes entre 1931 y 1972. En 1955, el papel del Cuerpo se expandió para incluir a la Ciudad de Nueva Orleans, lo que implicó mantener la capacidad y el francobordo de los antiguos canales de drenaje. Finalmente, después de una serie de demandas judiciales entre 1961 y 1977, el Cuerpo se vio obligado a emplear muros de contención de hormigón a lo largo de los canales de drenaje en hundimiento (Rogers, 2008).

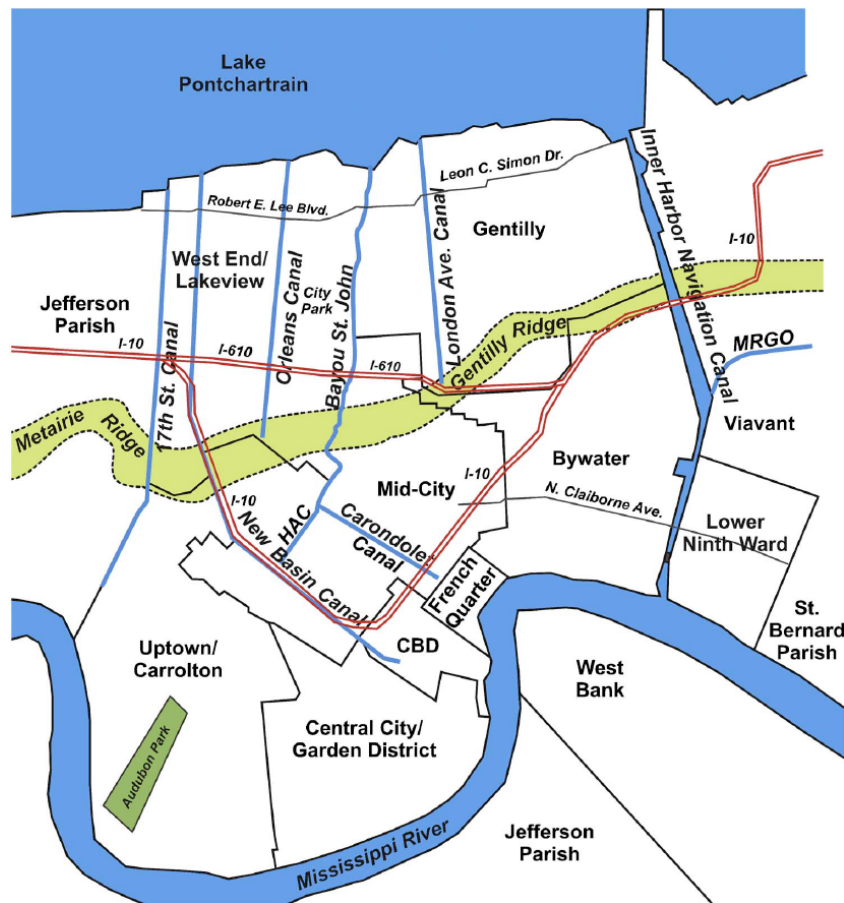


Figura 2.39: Principales desagües y barrios de Nueva Orleans
Fuente: (Rogers, 2008)

El sistema de diques y canales de Nueva Orleans siguió evolucionando a lo largo del siglo XX, sin embargo, las deficiencias en el diseño y mantenimiento quedaron expuestas durante el Huracán Katrina en 2005. Las fallas de los diques,

principalmente debidas a problemas estructurales y de diseño, llevaron a una reevaluación completa del sistema de protección contra inundaciones. Desde Katrina, se han invertido más de 14.6 mil millones de dólares en la mejora y reconstrucción del sistema de diques y canales, incluyendo la instalación de refuerzos, nuevos sistemas de drenaje, y mejores prácticas de gestión. En 2006 se creó la Southeast Louisiana Flood Protection Authority (SLFPA) que coordina los proyectos y planes de los diques en la región, asegurando una gestión más eficiente y centralizada (U.S. Army Corps of Engineers, 2021).

Así mismo, el huracán Katrina dejó en evidencia profundas desigualdades sociales y económicas de la ciudad ya que, los mayores daños se generaron en los barrios de bajos ingresos y predominantemente afroamericanos. Posteriormente, Nueva Orleans ha implementado políticas de mejora de infraestructura y desarrollo económico encaminadas a la reconstrucción de la ciudad, el paisaje litoral, la prevención de desastres y la disminución de las desigualdades sociales.

Como parte de los proyectos implementados a raíz de los daños ocasionados por el Huracán Katrina, se han planteado nuevas obras que involucran los canales y arroyos existentes, renovándolos e incorporándolos a nuevas estrategias para el manejo de las aguas, considerando, además, la subsidencia que presenta esta zona que alcanza los -1.5 m por debajo del nivel del mar. Por ejemplo, el proyecto Lafitte Blueway se desarrolla sobre 4 puntos fundamentales, (1) La recuperación histórica de la puerta que unía el pantano con el Barrio Francés a través de Bayou St. John y el canal de Carondelet. (2) Los canales de desagüe de Orleans Avenue y London Avenue pueden redefinir el carácter de los barrios bajos como vías navegables atractivas y accesibles al público. (3) El barrio de Filmore (Gentilly) es un barrio representativo de las tierras bajas, donde los canales circulantes en terrenos neutros pueden almacenar e infiltrar el agua. (4) Una gran parcela puede diseñarse para la conmemoración, educación, filtración y recreo para el barrio y la región en el Jardín del Agua de Mirabeau (Waggonner & Ball Architects, 2013).



Figura 2.40: Localización de los 4 puntos del proyecto Lafitte Blueway
Fuente: (Waggonner & Ball Architects, 2013).



Figura 2.41: Proyección corredores y áreas de drenaje transformadas proyecto Lafitte Blueway
Fuente: (Waggonner & Ball Architects, 2013).

Las inundaciones ocasionadas por el Huracán Katrina también han derivado en la realización de estudios e investigaciones, entre los que se destaca la Investigation of the Performance of the New Orleans Flood Protection Systems in Hurricane Katrina on August 29, 2005 por (Seed, *et al.*, 2006). Esta investigación se ha centrado en tres cuestiones principales (1) ¿Qué (2) ¿Por qué? y (3) ¿Qué tipos de cambios son necesarios para evitar que se repita una catástrofe de esta magnitud en el futuro?, para dar respuestas a estas inquietudes, los investigadores realizaron un análisis detallado de las alturas media de los diques Mississippi River & Tributaries (MR&T) sobre los diques naturales en la región del Golfo determinando que ésta asciende aproximadamente a 4,9 m. Por su parte, la cresta del dique de protección contra inundaciones a lo largo de la orilla oriental del río Mississippi es de 7,47 m MGL en Carrolton (MGL, Mean Gulf Level corresponde

con una referencia del nivel medio del mar en el Golfo de México). El dique de protección del lago Pontchartrain varía entre 4,1 – 5,5 m MSL. Todos los barrios al norte de Metairie Ridge se encuentran por debajo del nivel del mar. El peor escenario de inundación para Nueva Orleans sería una ruptura del dique del río Mississippi debido a su posición elevada, lo que engendraría una rápida erosión y altas velocidades de derrame, que podrían abrumar los barrios más bajos de la Ciudad antes de que los residentes pudieran efectuar un escape.

En las últimas décadas, también se han llevado a cabo proyectos significativos para restaurar y ganar terrenos mediante la creación y restauración de humedales, utilizando técnicas como la creación de islas artificiales y la replantación de vegetación nativa.

La figura 2.42 muestra las elevaciones de diseño del sistema de protección contra inundaciones, según el proyecto Mississippi River & Tributaries (MR&T).

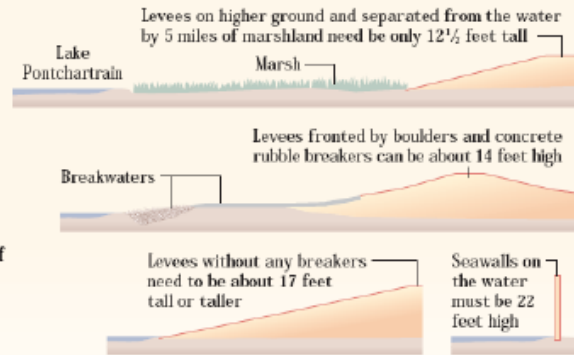
BARRIERS OF EARTH AND CONCRETE

Levees and floodwalls that protect against flooding from both the Mississippi River and hurricanes are built by the Army Corps of Engineers and are maintained by local levee districts. The corps and the local districts share the construction cost of hurricane levees, while the Mississippi River levees are a federal project. Local levee districts also build and maintain nonfederal, lower-elevation levees with construction money from each district's share of property taxes and state financing.

Levees on higher ground and separated from the water by 5 miles of marshland need to be only 12½ feet tall

HEIGHT ISN'T EVERYTHING

Different factors permit Lake Pontchartrain levees of varying elevations to withstand an 11½-foot storm surge plus several feet of waves:



Note: The height and shape of a levee is based on the roughness of the area over which waves pass to reach the structure, and the slope of the structure.

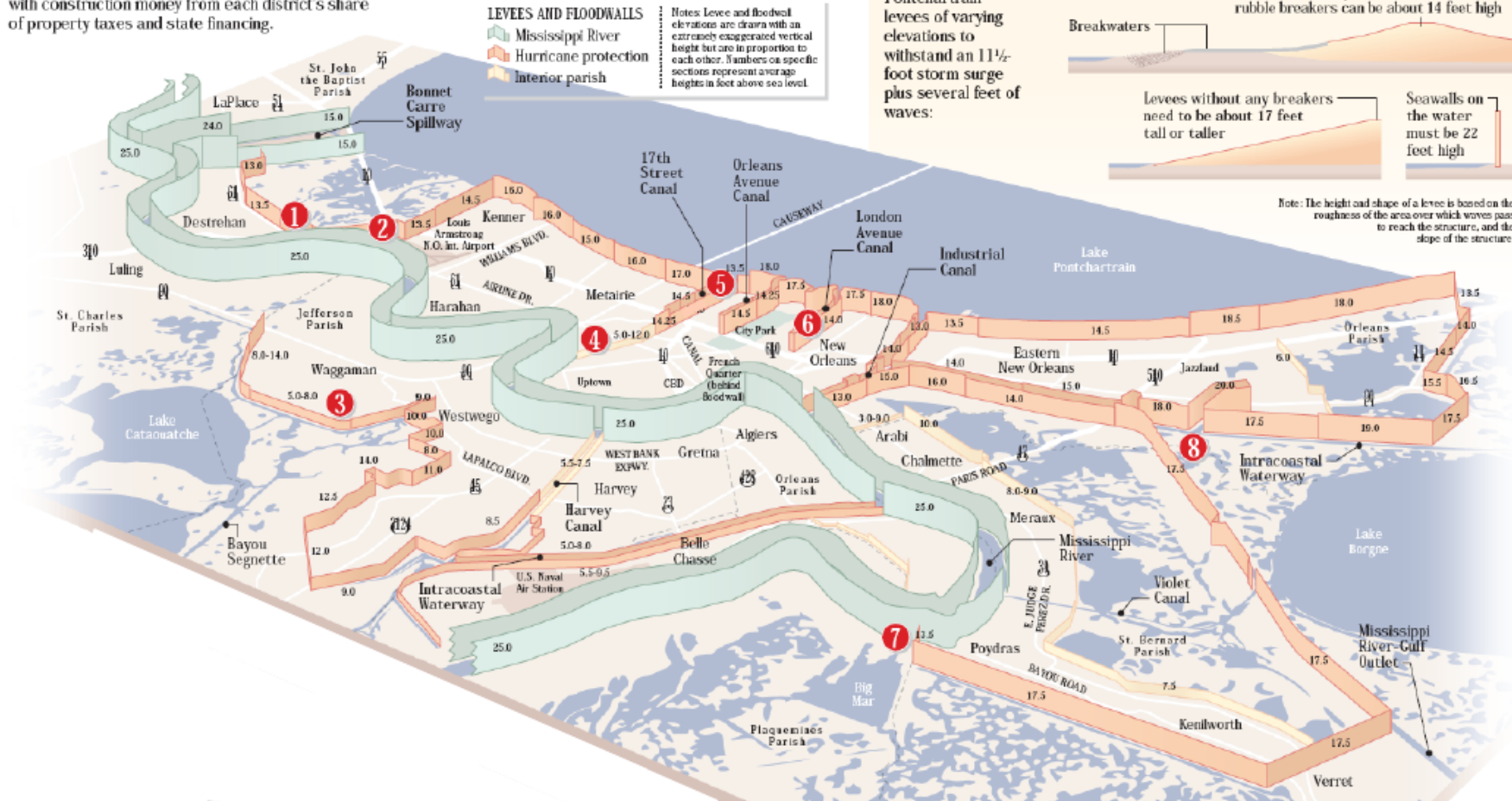


Figura 2.42: Elevaciones de diseño del sistema de protección contra inundaciones
Fuente: (Seed, *et al.*, 2006).

LAGO PONTCHARTRAIN SUROESTE - NORESTE

Parroquias Jefferson, St. Charles, St. John Baptist, Tangipahoa, St. Tammany y Orleans (costado final)

La costa norte de la Jefferson Parish ha sido objeto de diversos proyectos y obras a lo largo de la historia, de importancia para el análisis de la evolución del paisaje litoral en el área del caso de estudio n°3. A principios del siglo XX, se construyeron varios muelles y embarcaderos a lo largo de la costa para facilitar el transporte marítimo y el comercio. Estos incluían el muelle de Bucktown y el muelle de Bonnabel. En la década de 1930, se llevó a cabo un importante proyecto para mejorar la navegabilidad del lago Pontchartrain en el que se dragaron canales y se construyeron diques de contención a lo largo de la costa. Durante la década de 1950, se construyó el Causeway Lake Pontchartrain, una impresionante estructura de 38 kilómetros que cruza el lago Pontchartrain. En la década de 1970, se realizaron obras de restauración y protección de la costa, incluyendo la construcción de rompeolas y la reforestación de humedales. Más recientemente, en la década de 2000, se han llevado a cabo proyectos de mejora de la infraestructura costera, como la renovación de muelles y la construcción de nuevas instalaciones recreativas a lo largo de la costa (Curry, *et al.*, 1982).

El *Causeway Lake Pontchartrain* es un puente de 50 km de longitud que une las ciudades de New Orleans y Covington, 38 km se localizan sobre el Lago Pontchartrain siendo el puente más largo sobre agua. Debido a la estabilidad del nivel del lago y la ausencia de mareas, el puente se diseñó con una altura libre general de 4,90 m, incluyendo dos pasos levadizos de 7,60 m para facilitar la navegación. La idea original, propuesta en 1920, era construir islas artificiales en el lago conectadas por un pequeño puente, financiado por la venta de terrenos. En 1948, se designó una comisión para construir el Causeway, dirigida por James E. Walters. El puente original de dos carriles se inauguró en 1956, y un segundo puente paralelo de dos carriles, 15 m más largo, se abrió en 1969 (American Society of Civil Engineers (ASCE), 2013).

Para la construcción del puente se construyó una planta de ensamblaje de 40 acres en la orilla norte del lago Pontchartrain. Además, fue necesario drenar un canal de 1,200 pies de largo, 15 pies de ancho y 12 pies de profundidad para que las barcazas pudieran transportar sistemáticamente los componentes fabricados en la planta (pilotes, vigas y tableros) hacia el lago (Witcher, 2017).



Figura 2.43: Plaza de peaje del sur de la calzada del lago Pontchartrain, Metairie.
Fuente: Historic American Engineering Survey photo via Library of Congress website at <https://www.loc.gov/resource/hhh.la0640.photos/?sp=2&st=image>



Figura 2.44: Arranque norte Causeway Lake Pontchartrain, Mandeville.
Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=Lm0ZyeCEoOM>

Las obras de acceso al Causeway Lake Pontchartrain incluyen rampas de pendiente suave y carriles de aceleración que garantizan una transición segura y eficiente al tráfico del puente. Las plataformas para las cabinas de peaje están estratégicamente ubicadas en áreas ampliadas para evitar congestiones. En los extremos, se han implementado conexiones con otras vías de circulación mediante rampas y pasos elevados que minimizan interferencias en el flujo vehicular,

asegurando la integración eficiente con la infraestructura vial existente (American Society of Civil Engineers - ASCE, 2021), para estas obras se realizaron dragados y rellenos en la costa del lago que conllevaron a acreción de la costa. Recientemente, el proyecto de ampliación del Causeway Lake Pontchartrain gerenciado por Boh Bros utilizó el método de construcción a riesgo (CMAR), que incluyó la construcción de doce segmentos de hombros de seguridad de 1008 pies de longitud a lo largo de la alineación del puente existente. Para reducir al mínimo las interrupciones del tráfico, se optó por utilizar elementos prefabricados (pilotes, vigas y módulos del tablero), que se ensamblaron fuera del sitio y se transportaron por barco hasta el puente, esta estrategia de construcción acelerada les permitió completar el proyecto en menos de nueve meses (Merrill, 2021).

En las Parroquias St. Charles y St. John Baptist se encuentra el Área de gestión de la fauna salvaje Maurepas Swamp (Maurepas Swamp Wildlife Management Area), un extenso pantano de agua dulce que se extiende a lo largo de aproximadamente 28,300 hectáreas. Este pantano está conformado, entre otros, por el Wetland Watchers Park, un parque natural enfocado en la educación y conservación de los humedales, cuyo objetivo principal es promover la conservación y restauración de los humedales del Maurepas Swamp. Por el Maurepas Wildlife Trail que es un sendero natural de 16 km de longitud que recorre los humedales y bosques y está abierto al público para promover el contacto con el entorno natural, entre otros (Coastal Protection and Restoration Authority (CPRA), 2023). Las primeras actuaciones en la zona durante el asentamiento francés fueron realizadas por los exploradores Pierre Le Moyne d'Iberville y Jean-Baptiste Le Moyne de Bienville, quienes exploraron y mapearon extensivamente esta región a finales del siglo XVII y principios del XVIII, además, los franceses establecieron varios asentamientos y puestos comerciales como el Fuerte de Maurepas fundado en 1699, y construyeron fortificaciones y puestos de vigilancia para defender sus intereses coloniales en la región (Usner Jr., 1992). Para facilitar el transporte y el comercio fluvial, construyeron una red de canales y vías navegables en el humedal (Dawdy, 2008). Asimismo, los franceses explotaron los recursos naturales del Maurepas Swamp, como la madera de ciprés, la caza y la pesca, para abastecer a sus colonias e intentaron desarrollar actividades agrícolas y ganaderas en algunas áreas más secas del humedal con resultados limitados. Por su parte, durante el periodo español, se construyeron caminos, puentes y otras estructuras de infraestructura para facilitar el transporte y la comunicación en el humedal, mientras se establecían algunos asentamientos a través de la Misión de San

Bernardo, fundada en 1779, entre otras (Usner Jr., 1992). Con la adquisición de Luisiana por parte de Estados Unidos en 1803, los estadounidenses intensificaron la explotación de los recursos naturales del humedal, como la madera de ciprés, la caza y la pesca, para satisfacer la creciente demanda industrial y comercial y construyeron carreteras, ferrocarriles y canales para mejorar la conectividad y el transporte, así mismo, lograron desarrollar con más éxito actividades agrícolas y ganaderas en algunas áreas más secas del humedal (Colten, 2005). A lo largo del siglo XX, diversas obras de infraestructura han impactado negativamente la integridad del Maurepas Swamp y su interfaz con el lago Pontchartrain. La construcción de canales y vías navegables, como el Intracoastal Waterway y el Bayou Manchac, ha fragmentado y degradado el ecosistema de humedales, alterando los patrones de flujo de agua y sedimentos (Couvillion, *et al.*, 2011). Asimismo, el desarrollo de infraestructura de transporte, como la Interestatal 10, ha dividido y aislado porciones del Maurepas Swamp, interrumpiendo los procesos naturales de intercambio entre el humedal y el lago adyacente. Por otro lado, las actividades de extracción de recursos, como la explotación de petróleo y gas, así como la minería, han provocado la fragmentación y degradación del hábitat, además de la contaminación. Finalmente, el crecimiento urbano y residencial alrededor del Maurepas Swamp ha llevado a la conversión de terrenos de humedales, reduciendo la extensión y conectividad de este ecosistema (Barras, *et al.*, 2008). En conjunto, estas intervenciones humanas a lo largo del tiempo han afectado significativamente la costa del Maurepas Swamp contra el lago Pontchartrain.

En la Parroquia Tangipahoa se localiza el Área de gestión de la fauna salvaje de Manchac (Manchac Wildlife Management Area), una extensa área actualmente protegida de aproximadamente 12,140 hectáreas administrada por el Departamento de Vida Silvestre y Pesca de Luisiana (LDWF) que ha experimentado un desarrollo significativo a lo largo de las últimas décadas. Según (Visser, *y otros*, 1998) el MWMA está compuesto por humedales de agua dulce, marismas y bosques de ciprés, protegidos por la que el LDWF con el objetivo de conservar y gestionar los recursos naturales de la región. El mismo grupo investigador, 4 años después señala que el MWMA enfrenta desafíos como la degradación del hábitat, la invasión de especies exóticas además de los impactos provocados por el cambio climático (Visser, *et al.*, 2002).

La Parroquia St. Tammany que limita con el Río Tchefuncte y donde se localiza el Refugio St. Tammany y el Refugio Nacional de Vida Silvestre de Big Branch Marsh, históricamente estaba conformada por una zona costera compuesta por marismas que se han visto afectados por la afluencia de población, y el desarrollo urbano-suburbano que ha ido en aumento en los últimos años. En 1990 el abandono de embarcaciones, especialmente barcazas cisterna, que a menudo se utilizaban para el vertido ilegal de aceites de desecho y otros materiales peligrosos, representó problemas en el borde costero. A pesar de contar con normativa pertinente como la Sección 404 de la Ley de Agua Limpia de 1972 y la Ley de Ríos y Puertos de 1899, se han concedido históricamente numerosos permisos para la destrucción innecesaria de humedales que se suman a los casos de destrucción ilegal sin permiso y luego otorgados con posterioridad al hecho, dentro de los que se incluyen vertidos en los humedales que bordean el río Tchefuncte, que podrían ser ejecutados por personal del Northpark. Urbanizaciones como Three Rivers Estates, Piney Woods, Audubon Lake, Rosedown, Century Oaks, Greenleaves, la avenida 12th Street y Hwy 190, el hospital Depaul Northshore están construidos sobre humedales, generando destrucción de la capa vegetal y el paisaje natural de la zona. También, adyacente al hospital Depaul se han realizado trabajos preliminares, incluyendo drenaje, dragado y construcción de carreteras con la consecuente destrucción de aproximadamente 0,6 km² (150 acres) de humedales (St. Tammany Parish Police Jury, 1992). En esta zona se localizan también las localidades de Lewisburg y Mandeville.

Terminando el área de estudio, y nuevamente en la Parroquia de Orleans se localiza la parte sur de la Bahía Irlandesa (Irish Bayou). En esta zona se localiza La Eden Isle una comunidad residencial de lujo, con acceso al lago y a las áreas naturales circundantes desarrollada a finales de la década de 1960, que a lo largo de los años se ha expandido y se ha convertido en un destino turístico importante. También se encuentra la carretera estatal Chef Menteur Hwy (Ruta 90) que originalmente conectaba Nueva Orleans con las comunidades costeras y los puertos a lo largo del Golfo de México, y que actualmente proporciona un acceso importante al Refugio de St. Tammany y a otras áreas naturales de la región. Finalizando la zona y el área de estudio en el Refugio Nacional de Vida Silvestre Bayou Sauvage (Bayou Sauvage Urban National Wildlife Refuge) con un área de 93 km² de pantanos de agua dulce y salobre ubicado dentro de los límites de la ciudad de Nueva Orleans, es el refugio de vida silvestre urbano más grande de los Estados Unidos (Lowry, 1891).

2.5.3. Resultados, análisis y discusión

Para el caso de estudio nº3 se compararon las líneas de costas obtenidas del mapa histórico titulado “*Sketch H. Showing the progress of the Survey in Section No. 8 1846 – 1852*” de la United States Coast Survey, que corresponde con el mapa del delta del Mississippi en 1853; y la línea de costa del Lago Pontchartrain y la ciudad de Nueva Orleans obtenida de fotografías aéreas tomadas de Google Earth en 2023.

Una vez obtenida las líneas de costa base, de la época colonial (mapa de 1853) y la obtenida desde Google Earth (2023) tras realizar la superposición, se observó que no es posible hacerlas encajar como líneas continuas, por lo que se dejó como plantilla la línea de costa obtenida en 2023, mientras que la línea de costa obtenida del mapa de 1853 se escaló con un factor de 1,15 y se dividió en 3 partes para encajar más adecuadamente las líneas y realizar el análisis. La figura 2.45 muestra la superposición que mejor encajó las dos líneas de vectorizadas.

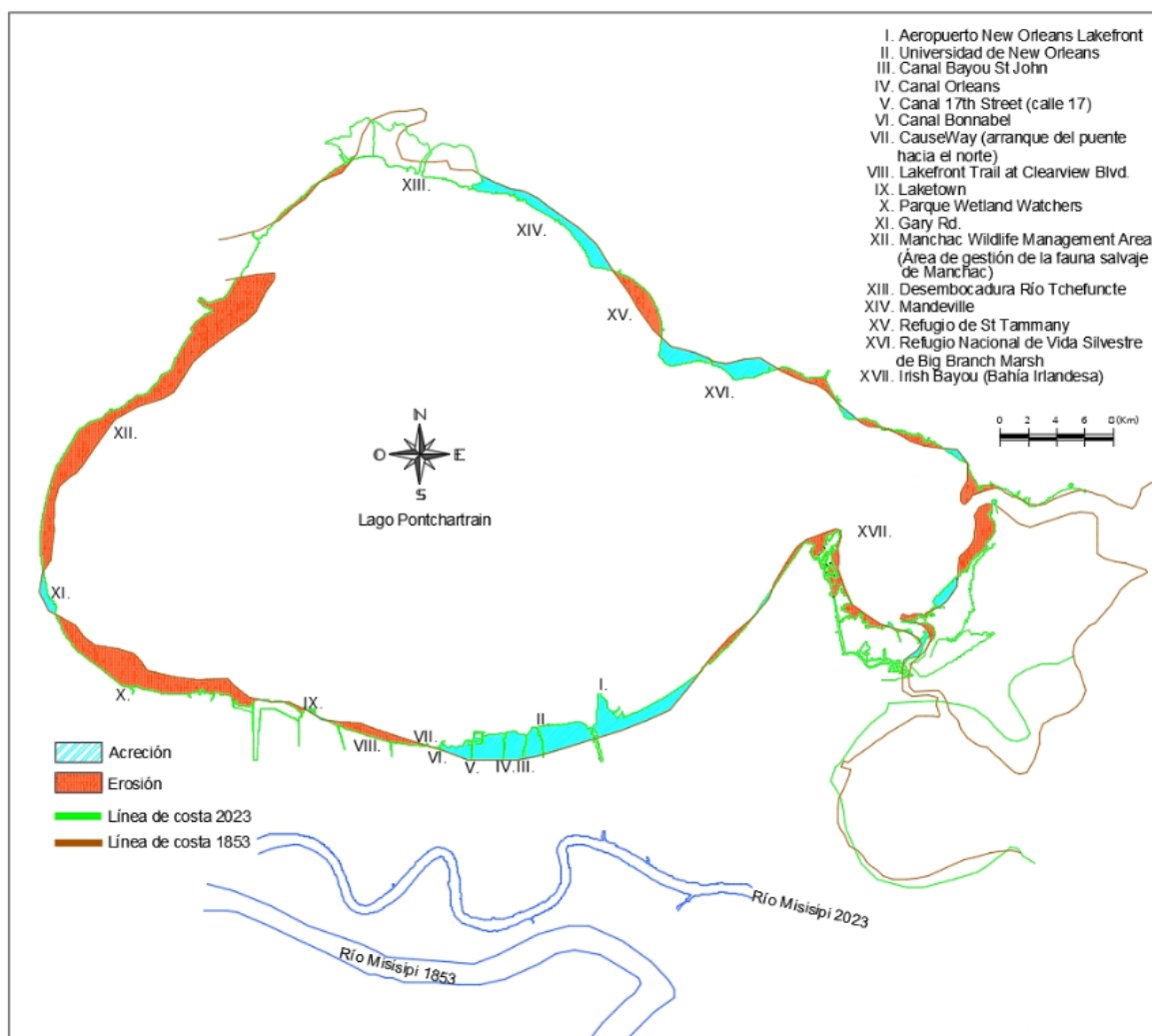


Figura 2.45: Superposición y comparación de líneas de costa 1853-2023.

Fuente: Elaboración propia

El análisis comparativo de mapas históricos y composiciones aéreas recientes reveló diferencias significativas en la posición y forma del río Mississippi. Por lo tanto, se excluyó el análisis de la línea de borde del río, centrándose en el borde del Lago Pontchartrain, cuya longitud de costa aproximada es de 290 km.

El estudio se realizó en el sentido de las agujas del reloj, comenzando por la costa de la ciudad de Nueva Orleans, continuando por el borde interior del Lago Pontchartrain y culminando con el análisis de la Bahía Irlandesa (Irish Bayou).

La tabla 2.3 muestra las áreas de acreción o erosión que se presentan en cada uno de los tramos de la costa del Lago Pontchartrain que fueron el objeto del presente estudio, así como la cuantificación final que, según se observa, resulta desfavorable para el área de estudio en general con una erosión que supera los 36 km².

Tabla 2.3: Balance final, erosión o acreción de la línea de costa del Lago Pontchartrain y Nueva Orleans

Tramo		Acreción km ²	Erosión km ²
I	Aeropuerto Nueva Orleans Lakefront	7,88	
II	Universidad de Nueva Orleans		
III	Canal Bayou St John		
IV	Canal Orleans		
V	Canal 17th Street (calle 17)	16,15	
VI	Canal Bonnabel		
VII	Causeway (arranque del puente hacia el norte)		
VIII	Lakefront Trail at Clearview Blvd		-3,15
IX	Laketown	0,19	
X	Parque Wetland Watchers		-19,18
XI	Gary Rd	1,23	
XII	Manchac Wildlife Management Area (Área de gestión de la fauna salvaje de Manchac)		-35,31
XIII	Desembocadura Río Tchefuncte	-	-
XIV	Mandeville	7,82	
XV	Refugio de St Tammany		-4,63
XVI	Refugio Nacional de Vida Silvestre de Big Branch Marsh	5,43	
XVII	Bahía Irlandesa (Irish Bayou)		-12,85
Subtotal		38,70	-75,12
TOTAL			-36,42

Las zonas I a VII que evidencian acreción de 24.03 km² por terrenos ganados al lago corresponde con la línea de costa de la Ciudad de Nueva Orleans y está compuesta principalmente por las siguientes construcciones: I. Aeropuerto New Orleans Lakefront, II. Universidad de Nueva Orleans, III. Desembocadura del Bayou St John, IV. Desembocadura del canal Orleans, V. Desembocadura del canal 17th Street (calle 17), VI. Desembocadura del canal Bonnabel y VII. Causeway (arranque sur del puente). Estas construcciones han sido modificadas con el paso del tiempo con el objetivo de convertirlas en estructuras de protección en sí mismas capaces de enfrentar los embates de las marejadas, huracanes e incluso el aumento del nivel del mar. Para la construcción del Aeropuerto Lakfront (zona I) se realizó un relleno hidráulico con el fin de elevar el terreno sobre el nivel del mar. El aeropuerto, originalmente denominado Abraham Lazar Shushan, fue construido entre 1929 y 1933 según el diseño del estudio de arquitectura Weiss, Dreyfous & Seiferth. Se construyó sobre una península artificial de terreno ganado al Lago gracias al Lakefront Improvement Project y se inauguró el 09/02/1934. Para su construcción fue necesario erigir un muro de contención de 3.048 m (10.000 pies) en el lago Pontchartrain y bombear seis millones de yardas cúbicas (~ 4.587.330 m³) de relleno hidráulico para elevar el campo por encima del agua. Por causa del paso del Huracán Katrina, y hasta octubre de 2005, el aeropuerto tuvo que cerrar debido que el interior del edificio estaba cubierto de agua en una altura superior a los 1.2 m, mientras que el exterior presentó inundaciones de hasta 2.4 m. Posteriormente, entre 2008-2013 fue remodelado para recuperar su arquitectura original (Anon., 2023) & (Louisiana Hometown. Hometown Productions - Broadcasting & Media, 2013). El resultado obtenido en esta investigación corresponde 7.88 km² de acreción.



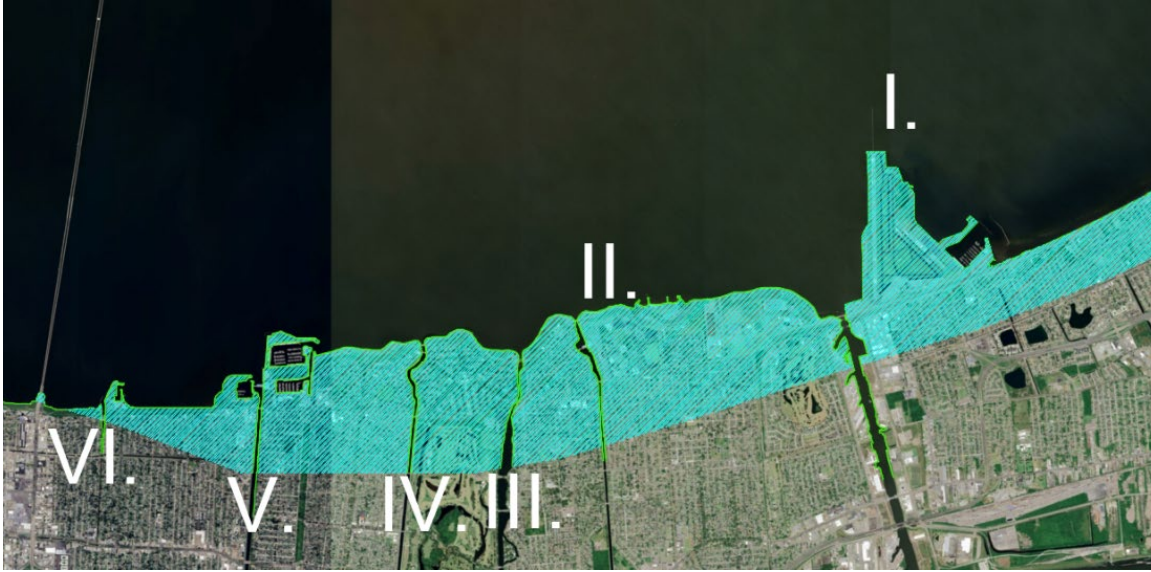


Figura 2.46: Mapa de acreción por el proyecto de Lakefront.

Fuente: Biblioteca del Congreso, (Campanella, 2018) y elaboración propia.

<https://www.raremaps.com/gallery/detail/73429/map-of-the-city-of-new-orleans-and-vicecity-july-1925-guillot-adam>

El Lakefront Improvement Project ejecutado entre 1926 y 1934, que consistió en la construcción de un dique localizado entre 914 y 1219 m metros dentro del lago. El terreno limitado por el dique y la línea de costa de 1926 fue dragado de sedimentos y sobre éste se realizó un relleno bombeado gradualmente. La ejecución del dragado y relleno tardó más de tres años y resultó en la acreción de 8,1 km² (2000 acres) elevados entre 1.2 y 1,8 m (4 y 6 pies) por encima del nivel del lago (mar), y alrededor de 3 m (10 pies) por encima de las tierras bajas de Lakeview y Gentilly, que se estaban hundiendo. En 1930 se completó el dique de hormigón escalonado. Una vez finalizado el proyecto en 1934, nuevos barrios como Lake Vista, Lakeshore, Lake Terrace y Lake Oaks desarrollados sobre todo después de la Segunda Guerra Mundial, ocuparon tanto los terrenos ganados como los terrenos ocupados por las comunidades históricas ribereñas Port Pontchartrain y la antigua Milneburg (Campanella, 2018).

El proyecto también afectó la comunidad Spanish Fort situada en la desembocadura del Bayou St. John, el Old Basin Canal y el West End at circa-1838 New Basin Canal, que convirtió el flanco oriental de West End en tierra, que finalmente fue transformado en puerto en 1938.



Figura 2.47: West End a la derecha, y Spanish Fort y Milneburg en 1922 cuatro años antes del Lakefront Project. Cortesía del Museo Estatal de Luisiana para (Campanella, 2018).

Las zonas II a VII donde se ubican diferentes desembocaduras de canales y arroyos naturales que transportan agua desde el interior de la ciudad hacia el lago, han sido parte de diferentes planes de drenaje y continencia para inundaciones que incluyen actuaciones de refuerzo, rellenos y modificación de la morfología con el fin de garantizar que se mantengan firmes en la protección de la ciudad. El canal Bayou St. John en su recorrido hacia el lago pasa por las ruinas del el Fuerte Bayou Saint John (Saint John Fort), construcción que originalmente se localizaba en la desembocadura del Bayou Saint John en el Lago Pontchartrain (siglo XVIII), actualmente los restos del fuerte son visibles en el área conocida como Spanish Fort, parque histórico en Nueva Orleans y se localiza aproximadamente a 500 m de la desembocadura del canal, lo que permite constatar la acreción que se ha generado en la zona (figura 2.48). Por su parte, obras de mantenimiento y reconstrucción han sido necesarias en el Canal de la Calle 17 (17th Street Canal) previo al paso del huracán Katrina, una de las cuales se debe al deterioro en los muros de hormigón observado durante inspecciones realizadas entre 1980-1981 para las que, después de diferentes planteamientos de solución, finalmente en 1992-1993 se construyó un muro de contención de tablestacas de acero para soportar los muros de hormigón en la coronación del dique (Rogers, 2008).



Figura 2.48: Distancia desde Fuerte St. John hasta desembocadura actual.
Fuente Google Maps 2023.

La historia muestra diversos proyectos y obras menores de reparación, refuerzo, modificación y nuevas construcciones en los diques de los canales de drenaje y los diques frente al Lago con el fin de proteger la ciudad (Seed, *et al.*, 2006). Después de realizar el análisis y la comparación de los resultados con investigaciones previas, se concluye que los 24,03 km² de acreción obtenidos durante esta investigación están acordes con el desarrollo histórico de estas zonas.

Las zonas VIII a XII han arrojado una erosión de 57,64 km², siendo más del 75% de la erosión total del área de estudio. La región del Maurepas Swamp ha experimentado una significativa pérdida de superficie en las últimas décadas. Diversos factores han contribuido a este fenómeno, entre ellos la subsidencia del suelo, el aumento del nivel del mar y el impacto de huracanes, que, además se correlacionan entre sí, por ejemplo, la subsidencia del suelo, causada por el drenaje, la extracción de agua subterránea y la compactación, ha provocado que el nivel del agua aumente y los humedales se conviertan en cuerpos de agua abiertos.

Según (Krauss, 2017), la zona desde *Maurepas Swamp* hasta *Manchac Wildlife Management Area*, debido a su naturaleza, ha presentado pérdida de su extensión original ocasionada por la degradación y subsidencia, y que, actualmente tiene solo

el 30% del área con un dosel forestal cerrado, el 58% en transición y 12% en humedal abierto y severamente degradado. La pérdida de terrenos se origina primordialmente por el aumento de la salinidad de sus aguas que, estando conformado por bosques pantanosos dominados por ciprés calvo y tupelo de agua, son ecosistemas de agua dulce sensibles a la intrusión de agua salada. El proyecto PO-29: River Reintroduction Into Maurepas Swamp tiene como objetivo la reintroducción del río Mississippi en la zona para mantener la salinidad promedio anual por debajo de umbrales críticos para estas especies (Coastal Protection and Restoration Authority (CPRA), 2023).

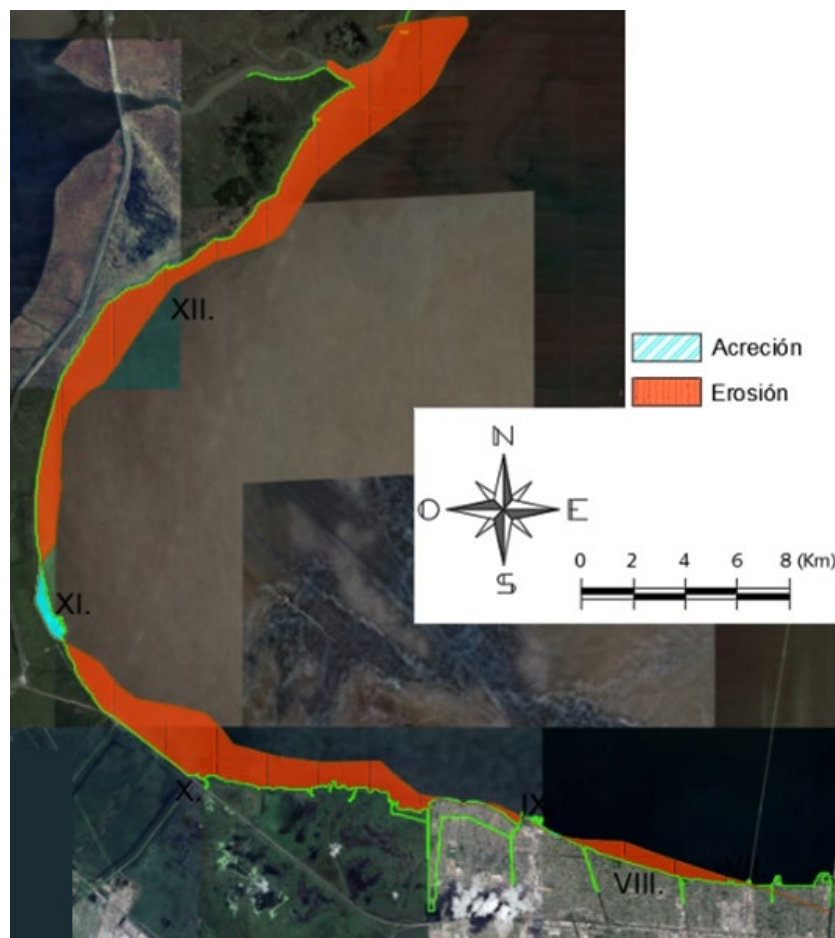


Figura 2.49: Erosión y acreción en zonas VIII-XII.
Fuente: Elaboración propia sobre imagen aérea de Google Maps 2023.

Así mismo, la erosión también está asociada a la expansión de áreas para usos residenciales, comerciales o agrícolas, al drenaje de pantanos y al relleno de áreas húmedas para el cambio de uso de la tierra, así como a las alteraciones en los flujos de agua y en los regímenes de inundación. Investigaciones realizadas por (Couvillion, *et al.*, 2011) han demostrado que los fenómenos episódicos, como los

huracanes y otras tormentas extremas, han contribuido significativamente a la pérdida de tierras costeras, sobre todo en los últimos años. Las tasas anuales de pérdida de tierras costeras de 1985 a 2010 que se calculó en $-16,57 \text{ mi}^2$ ($-42,92 \text{ km}^2$) aumentó aproximadamente $4,8 \text{ mi}^2/\text{año}$ ($12,43 \text{ km}^2/\text{año}$) en relación con las tendencias de 1985 a 2004 de $-11,76 \text{ mi}^2$ ($-30,46 \text{ km}^2$), lo que refleja una aceleración de la pérdida de tierras costeras inducida por los huracanes. Esto es coherente con los análisis previos descritos en (Barras, *et al.*, 2008). Además de la pérdida inmediata causada por los impactos físicos directos, se ha observado que los huracanes inducen un estrés excesivo en las plantas, como por ejemplo por la elevada salinidad y sulfuros provocados por las tormentas (Steyer, *et al.*, 2010), lo que se ha sugerido que contribuirá a futuras pérdidas de humedales. Ese mismo análisis ha mostrado zonas en las que no se observaron pérdidas de forma inmediata tras la llegada de una tormenta concreta, pero cuyas consecuencias empezaron a aparecer de forma consistente varios meses después. El estrés inducido por la tormenta probablemente contribuyó al menos a algunas de las pérdidas observadas. Tras el análisis de estudios anteriores, el resultado obtenido por este grupo investigador de $57,64 \text{ km}^2$ de erosión corresponde fielmente a la pérdida de pantanos, humedales y vegetación de las zonas descritas.

Igualmente, el acelerado aumento del nivel del mar en la región del Golfo de México ha inundado progresivamente los ecosistemas costeros. Por otro lado, los huracanes que azotan la costa, como Katrina y Rita, han causado daños severos a la vegetación de los humedales a través de marejadas ciclónicas y vientos fuertes. Finalmente, las actividades humanas como la construcción de infraestructuras, la contaminación y el desarrollo urbano han fragmentado y degradado aún más los ecosistemas. En conjunto, estos factores naturales y antrópicos han dado lugar a una preocupante pérdida de superficie del Maurepas Swamp en las últimas décadas.



Figura 2.50: El pantano de Maurepas, en el sureste de Luisiana

Fuente: <https://www.usgs.gov/media/images/maurepas-swamp>

Zona XIII Desembocadura Río Tchefuncte, para esta zona no se ha calculado el área de acreción o erosión debido a que el mapa de 1853 muestra una entrada del agua importante y doble línea de costa, además al contrastarse con la situación de la zona en 2023 se observa la constitución de lagos artificiales y humedales predominantemente cubiertos de agua lo que imposibilita la definición de líneas de costas comparables. En esta zona se localiza el South East Madisonville/Mandeville Marsh un importante humedal costero de agua salada clasificado como un pantano de marisma, al sureste de las ciudades de Madisonville y Mandeville, en la parroquia de St. Tammany. Está dominado por vegetación típica de marismas costeras, como juncos, Espartinas y manglares que actúa como un amortiguador natural contra inundaciones y tormentas, protegiendo las comunidades cercanas.

Zona XIV Mandeville, en esta zona se localizan la Comunidad Lewisburg, la ciudad Mandeville y el parque estatal Fontainebleau, según los resultados obtenidos la zona presenta una acreción que asciende a los 7,82 km². La construcción de hoteles, casas de veraneo y el muelle durante la segunda mitad del siglo XIX, y de nuevos barrios residenciales y comerciales durante el siglo XX, junto con la construcción

de la Causeway (costado norte) en 1956, no solo impulsaron el desarrollo de la ciudad, sino que significaron obras de rellenos artificiales que ganaron terrenos al lago.



Figura 2.51: Acreción en la zona XIV Mandeville.
Fuente: Elaboración propia sobre imagen aérea de Google Maps 2023.

Mandeville se encuentra en una antigua plataforma elevada que se formó a lo largo de la costa norte del lago Pontchartrain durante la última era glacial. Cuenta con 2,5 kilómetros de costa en este lago de clima templado, donde la vegetación varía entre robles, magnolias, cipreses y pinos. Los principales cursos de agua son el Bayou Chinchuba, el Bayou Castine y el Ravine aux Coquilles. Existe evidencia de planificación urbana establecida desde finales del siglo XIX, lo que ha permitido mantener un entorno construido de alta calidad, escala y proporción. Las pautas de planificación han establecido lotes espaciosos, retranqueos de construcción y un control de las densidades residenciales y comerciales. Además, existe un límite de altura de 35 pies para preservar el predominio de la cubierta arbórea de pinos y maderas duras. La Comisión de Parques y Vías Verdes continúa adoptando normas de paisajismo para proteger la vegetación existente y exigir la reposición de los árboles perdidos (City of Mandeville City Hall, 2024). La línea de costa se debe en gran medida al proyecto Mandeville Lakefront de 1834 ejecutado por Jean Bernard de Mandeville, quien generó un parque pasivo de aproximadamente dos kilómetros de longitud, mediante un pacto de protección. En el recorrido se localizaban numerosos muelles privados y públicos, tráfico de barcos a vapor, un vagón de ferrocarril eléctrico y casas de baños. De la época dorada (1870-1930) sólo quedan el mirador, reconstruido en diversas ocasiones y la fuente. Por su parte, Lewisburg es una comunidad formada en la década de 1770, que inicialmente se localizaba

desde la costa norte entre Bayou Castine y el río Tchefuncte. Después de diversas transacciones finalmente obtuvo su nombre actual en 1833 cuando los herederos de Joshua Lewis bautizaron la parcela en su honor. Posteriormente dividieron el terreno y lo vendieron según se observa en la figura 2.52 a continuación:

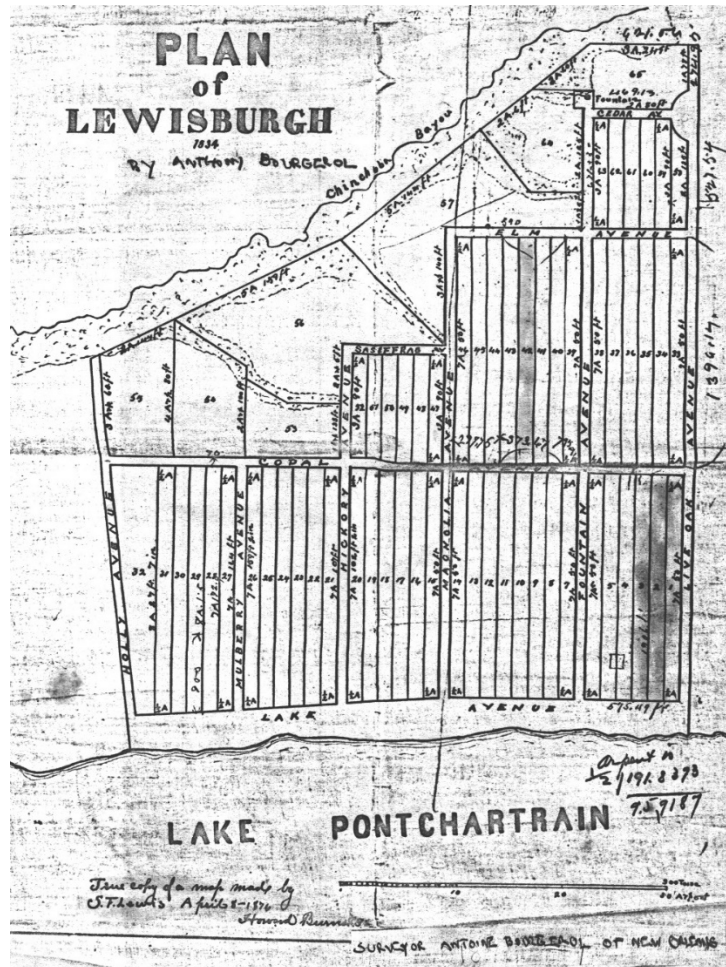


Figura 2.52: División Lewisburg.

Fuente: <https://tammanyfamily.blogspot.com/2019/05/the-early-history-of-lewisburg.html>

Según (Ellis, 1981), en 1862 a causa de la guerra civil, todos los muelles y desembarcaderos fueron quemados para obstaculizar la aproximación del barco de la Unión y sus soldados. En 1880 se instala en la zona el aserradero Poitevent & Favre en Lewisburg, ubicado justo al lado de la plaza de peaje norte de la actual Lake Pontchartrain Causeway. Precisamente, en 1956 inicia la construcción del Lake Pontchartrain Causeway en dos fases, en la primera fase (1956-1958) ejecutada entre 1956 y 1958 se construye la primera sección del puente de dos carriles con una longitud de 24 kilómetros (15 millas). En la segunda fase (1966-1969), y debido al aumento del tráfico, se realiza una ampliación del puente agregando una segunda sección paralela (Editorial, 1957). Las diferentes fuentes

históricas de la zona permiten establecer que el valor de acreción obtenida de 7,82 km² en la zona es adecuado.

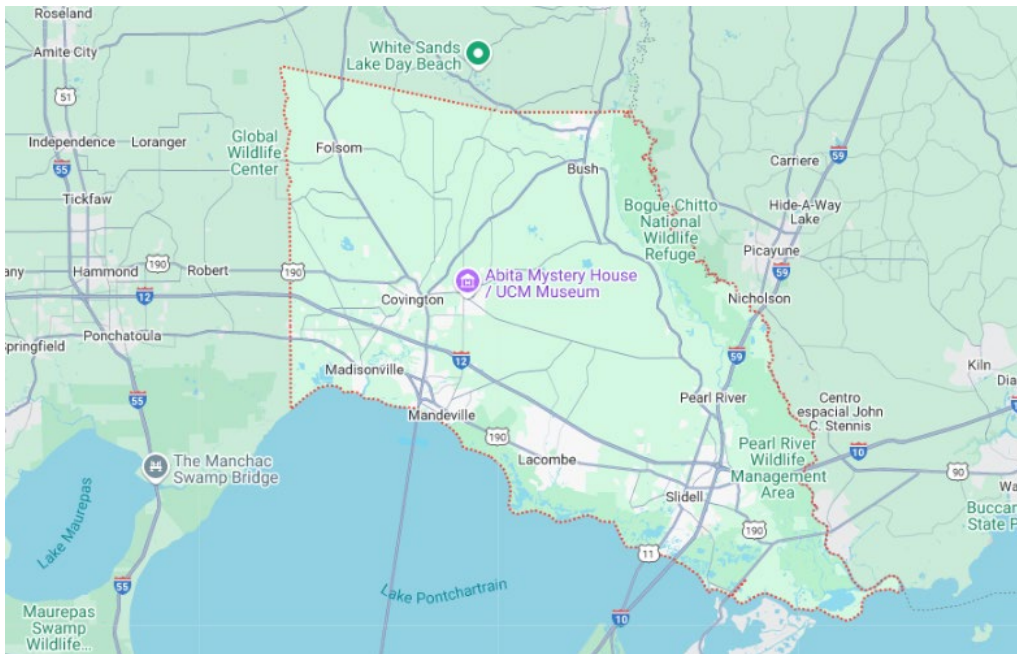


Figura 2.53: Parroquia de St. Tammany, Luisiana EE. UU
Fuente: Google Maps, 2024

Zona XV Refugio de St Tammany presenta erosión costera de 4,63 km², corresponde con un área actualmente protegida que abarca aproximadamente 19,400 hectáreas de humedales, pantanos, bosques y praderas. Nuevamente esta conformación vegetal expone el área a erosión ocasionada tanto por el desarrollo Urbano, Agrícola como por la extracción de petróleo, gas natural y la minería que han resultado en la pérdida de hábitats dentro de los límites del refugio, sin olvidar que los recurrentes huracanes e inundaciones en la región han erosionado y dañado los humedales y pantanos del refugio a lo largo del tiempo. El Refugio de vida silvestre de St. Tammany se localiza en St. Tammany Parish, hace parte de una adquisición más grande comprada por el estado a Great Southern Lumber Company en 1938. Aproximadamente 5,3 km² (1,310 acres) de la compra original siguen siendo un refugio de vida silvestre propiedad de LDWF. La erosión causada por la acción de las olas del lago Pontchartrain ha reducido la superficie original del refugio (Departament of Louisiana Wildlife & Fisheries, 2024). Los resultados de este estudio que evidencian una erosión costera se consideran conformes con estudios realizados previamente

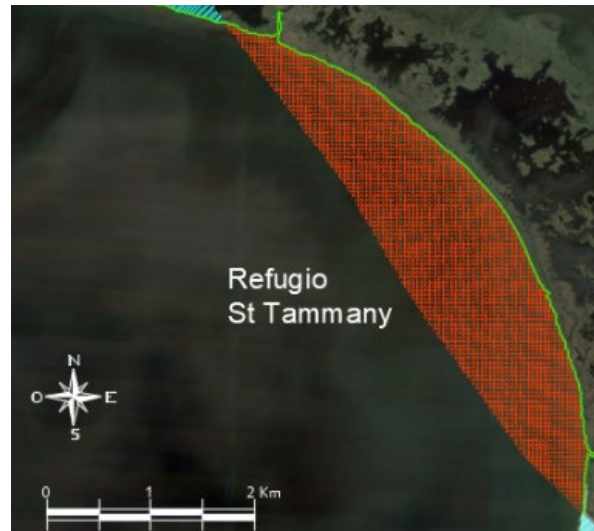


Figura 2.54: Erosión en la zona XV Refugio de St. Tammany.
Fuente: Elaboración propia sobre imagen aérea de Google Maps 2023.

Zona XVI Refugio Nacional de Vida Silvestre de Big Branch Marsh, se ubica adyacente al Refugio de St. Tammany (zona XV) y abarca aproximadamente 7,300 hectáreas de humedales, pantanos y bosques. Este estudio ha obtenido una acreción en esta zona de 5,43 km². Este resultado favorable concuerda con los proyectos y obras de reconstrucción realizadas posterior al Huracán Katrina de 2005 entre las cuales se destacan la reconstrucción del paseo marítimo de Boy Scout Road Trail en 2007, la replantación de árboles en el refugio durante los años 2006-2007 (U.S. Fish and Wildlife Service, 2007), y la restauración de la marisma en las áreas de Goose Point y Point Platte en 2008 a través de la instalación de cercas de árboles algunas áreas de la marisma que reducen la acción de las olas, atrapan sedimentos y combaten la erosión (Departamento del Interior de los Estados Unidos, 2024).



Figura 2.55: Acreción en la zona XVI Refugio Nacional de Vida Silvestre de Big Branch Marsh
Fuente: Elaboración propia sobre imagen aérea de Google Maps 2023.

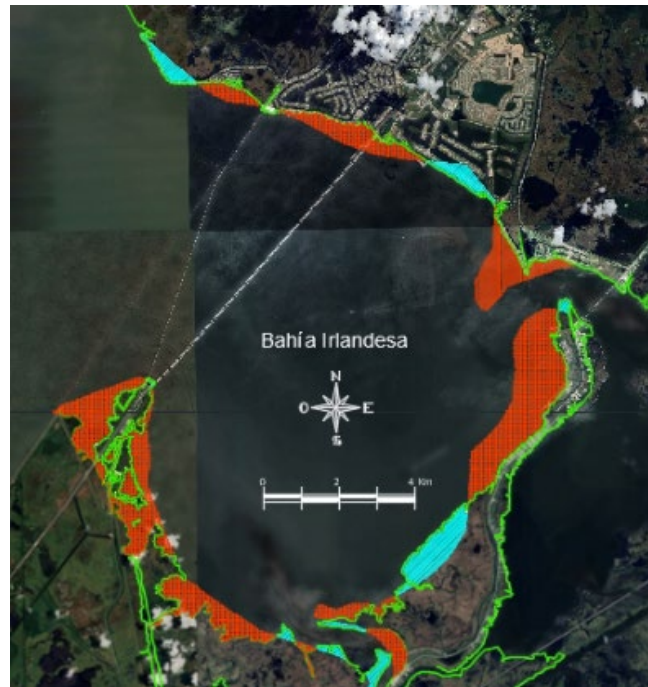


Figura 2.56: Erosión y acreción en la zona XVII Bahía Irlandesa
Fuente: Elaboración propia sobre imagen aérea de Google Maps 2023.

Zona XVII Bahía Irlandesa (Irish Bayou), se ha analizado una longitud de aproximadamente 80 km que presenta zonas de erosión y acreción intercaladas con un total final obtenido de 12,85 km² de erosión. Como punto de acceso desde el Golfo de México al Lago, esta zona ha sido altamente afectada por el ingreso de agua salobre y vientos huracanados a lo largo de la historia. Por su parte, la construcción de puentes de comunicación y comunidades de vivienda residencial, han contribuido con el incremento de tierras ganadas a las masas de agua circundantes. Desde que el Huracán Katrina destruyó parte del área de estudio se han venido implementado planes y proyectos de mejora y prevención. Recientemente, tal y como lo ha expuesto (Bollfrass, 2022) el proyecto denominado Bayou Sauvage Marsh Creation pretende ejecutar la instalación de más de 3.000 m (10.000 pies lineales) de esteras de hormigón articulado a lo largo de la costa del lago Pontchartrain para conformar diques de protección contra huracanes del este de Nueva Orleans. Dragar hidráulicamente material del lago Pontchartrain para crear 0,8 km² (200 acres) de marisma y nutrir 0,04 km² (10 acres) de marisma rota, para beneficiar al final de su ejecución un total de entre 0,8 y 1,0 km² (200-250 acres) beneficiados. El desarrollo histórico de las protecciones post Katrina, así como los planes a futuro evidencian que la zona fue muy afectada y que los resultados de erosión obtenidos por este grupo investigador son coherentes. El estudio de la (Coalition to Restore Coastal Louisiana, 1999) indica que, a medida

que se pierden los humedales y las islas de barrera, incluso áreas que antes se consideraban seguras, como la Bahía Irlandesa, se volverán más vulnerables a las inundaciones y los daños por tormentas.

Según los pronósticos de (Coastal Protection and Restoration Authority of Louisiana, 2017), en un escenario ambiental intermedio y sin la implementación de medidas de mitigación necesarias, se prevé que la costa de Luisiana sufrirá un cambio significativo en el uso del suelo durante los próximos 50 años. Esto se traduce en la pérdida de terrenos, tal y como se observa en la figura 2.57. El rojo indica áreas que se prevé se perderán mientras el color verde corresponde con los terrenos de posible acreción. Así mismo, el *Plan Maestro Costero de 2017* incluye proyectos que reducirán eficazmente los daños causados por las inundaciones en toda la costa en distintos niveles. Las comunidades a lo largo de la orilla del lago Pontchartrain, especialmente Slidell, Lacombe, Mandeville, Madisonville y Ruddock, se beneficiarán de la implementación de proyectos de protección estructural. Además, dicho Plan Maestro identifica muchos lugares en donde se implementarán proyectos estructurales y no estructurales en conjunto para proporcionar reducción de riesgos.

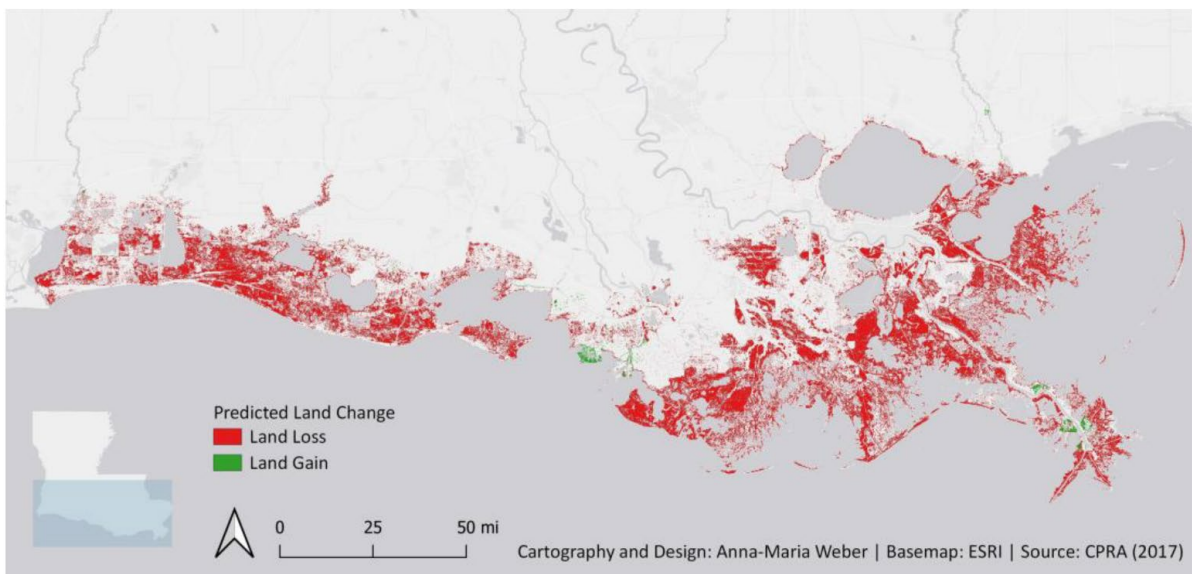


Figura 2.57: Pérdida masiva de tierra prevista en los próximos 50 años
Fuente: CPRA, 2017

Por su parte, la figura 2.58 muestra los tipos de costa que se localizan en el área del caso de estudio n°3, que varían entre diques naturales, tierras altas, pantanos, marismas y suelo urbanizado.



Figura 2.58: Tipo de costa en el Lago Pontchartrain y Nueva Orleans
Fuente: (Coalition to Restore Coastal Louisiana, 1999)

La figura 2.59 muestra el resultado de la investigación de (Couvillion, *et al.*, 2011), realizando una extracción de la zona de estudio, en donde, en la parte derecha de la imagen se establecen los años y el resultado final en términos de erosión o acreción. Al comparar estos resultados con los obtenidos en esta investigación, se evidencia que las zonas que presentan erosión están directamente asociadas con el tipo de costa de la figura 2.58, siendo mayormente afectadas las costas compuestas por vegetación.

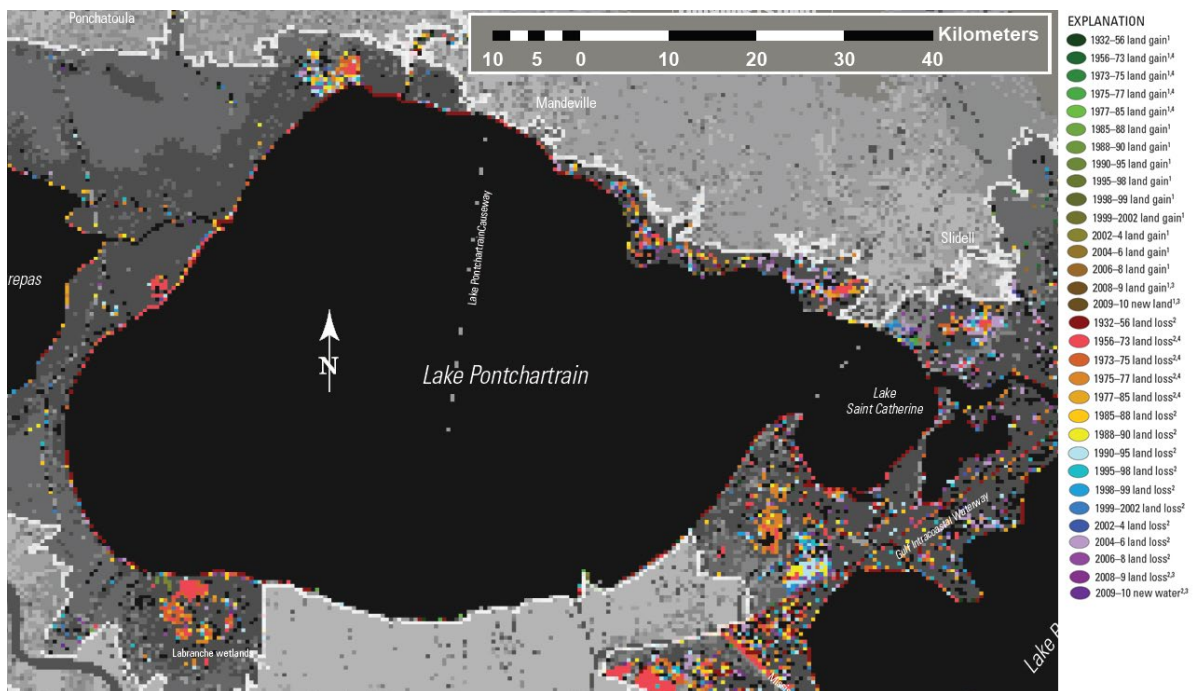


Figura 2.59: Erosión y acreción línea de costa Lago Pontchartrain
Fuente: (Couvillion, et al., 2011)

Luego de comparar los resultados obtenidos para este caso de estudio con investigaciones anteriores, se puede evidenciar que los mismos se encuentran acordes tanto con los factores históricos que han ido modelando el paisaje litoral como con resultados cuantitativos de investigaciones previas. La figura 2.60 a continuación muestra la tabla de resultados de (Couvillion, *et al.*, 2011) en la se evidencia que la erosión en el área de estudio es considerablemente superior a la acreción presentada.

Basin	1932-56	1956-73	1973-75	1975-77	1977-85	1985-88	1988-90	1990-95
Loss								
Pontchartrain	-34.41	-32.50	-12.74	-12.84	-9.47	-6.88	-9.67	-11.07
Basin	1932-56	1956-73	1973-75	1975-77	1977-85	1985-88	1988-90	1990-95
Gain								
Pontchartrain	1.59	1.69	0.61	0.17	0.30	0.16	0.28	0.20

Figura 2.60: Cuantificación erosión y acreción costa del lago Pontchartrain, según la definición del Programa de la Ley de Planificación, Protección y Restauración de los Humedales Costeros (n.d.). Fuente: (Couvillion, et al., 2011)

Los resultados de (Coastal Protection and Restoration Authority of Louisiana, 2017) sugieren que, de no seguir las propuestas del plan, la costa de Luisiana corre el riesgo de perder entre 2118 y 4677 km² de tierra en los próximos 50 años, y que, en caso de ejecutar los proyectos de protección y restauración propuestos en el *Plan Maestro*, podría mitigarse entre el 40% y el 75% de esa pérdida. El mantenimiento a largo plazo de los efectos del proyecto se ha conseguido con mejores resultados en zonas de baja SLR y subsidencia, con una fuente de sedimentos para apoyar la acreción de las marismas.

3. Material y métodos

3.1. Método de análisis, casos de estudio

La evolución espacio-temporal de la morfología litoral en los casos de estudio se ha visto influenciada por dos factores principales: 1) las condiciones geográficas y ambientales inherentes a cada emplazamiento costero, y 2) los cambios en el uso y ocupación antrópica del suelo litoral, los cuales han generado alteraciones en los ecosistemas y paisajes naturales adyacentes. Estas transformaciones pueden atribuirse, en gran medida, a la intervención directa del ser humano. En los casos de estudio analizados, las primeras actuaciones antrópicas estuvieron motivadas por la necesidad de defender y fortalecer las nacientes ciudades-puerto, lo que propició una construcción masiva de infraestructuras de fortificación por parte de los imperios colonizadores, con el objetivo de proteger los accesos a sus territorios interiores y hacerlos más resilientes frente a los continuos ataques de otras potencias imperiales.

El análisis de la línea de costa en cada caso de estudio empezó con la búsqueda exhaustiva de cartografía histórica de la época colonial que contuviera información gráfica detallada y precisa, que permitiera trazar con exactitud la configuración costera de dicho período, vectorización. Los mapas seleccionados debían cumplir con los siguientes requisitos técnicos: resolución de imagen óptima, disponibilidad para uso académico, trazabilidad de la procedencia y ubicación de los documentos, y capacidad de georreferenciación mediante herramientas SIG, con el objetivo de facilitar futuras investigaciones y análisis comparativos a lo largo del tiempo.

En una segunda etapa, se procedió a la captura de imágenes aéreas de Google Earth para el levantamiento de la línea de costa actual. Dichas capturas debían cumplir con requisitos técnicos específicos, tales como resolución óptima, que permitieran garantizar los mismos estándares de calidad y trazabilidad establecidos para la cartografía histórica. En los casos de estudio que abarcaban áreas más extensas, fue necesario fraccionar las capturas de Google Earth y posteriormente ensamblar una imagen completa del área analizada.

Posteriormente, cada línea de costa fue georreferenciada utilizando el Sistema de Información Geográfica de Software Libre QGis versión 3.4.8. Este software permite el acceso a la información remota a través de los servidores de Datos

(DATUM) que varía según el país y que facilita el acceso a la cartografía georreferenciada de cada área de estudio. La georreferenciación tiene una proyección por Transverse Mercator. La exactitud y precisión de la georreferenciación dependen de la presencia de puntos de control que satisfagan los siguientes criterios: (i) Los puntos de control deben ser inequívocos y claramente identificables. (ii) Los puntos de control deben pertenecer a elementos representados con precisión. (iii) Los puntos de control deben corresponder a elementos que se consideren invariables en el tiempo. (iv) Los puntos de control deben tener una distribución homogénea y uniforme en la zona de estudio (Álvarez-Rogel & Conesa García, 2018).

Inicialmente, la vectorización también se consideró a través del programa QGis, sin embargo, la precisión alcanzada fue muy baja, por lo que finalmente el plano georreferenciado se exportó de QGis a AutoCAD, convirtiendo las coordenadas geográficas en coordenadas planas. La vectorización, entonces, se realizó empleando el software de diseño asistido por computadora utilizado para dibujo 2D, AutoCAD en su versión 2013. La precisión durante la vectorización se realizó con el énfasis de que los vectores fueran capturados en la misma escala que el plano real. La captura del objeto espacial vectorial es un tipo de geometría poligonal y se realizó utilizando la posibilidad de ajustar los puntos de definición de las entidades vectoriales a la trama (imagen) manualmente. Durante el ajuste se utiliza la herramienta de zoom para marcar los puntos con mayor precisión. Para mayor claridad, todas las figuras contienen escalas gráficas.

La precisión vectorial basada en planos digitalizados considera que el mínimo detalle presente en un plano es de $0,2\text{mm}^3\text{E}$, donde E es el denominador de la escala del plano. La constante 0,2 mm corresponde a la separación mínima discernida por el ojo humano por término medio, lo que supone un error máximo real de 0.4 m.

Posteriormente, se creó una base de datos independiente para cada una de las líneas de costa vectorizadas. Estos conjuntos de datos homogéneos comparten la misma representación espacial (puntos, líneas o polígonos) y atributos asociados, permitiendo su gestión y análisis de forma organizada y sistemática.

Las líneas costeras se compararon superponiéndolas entre sí, y los cuerpos de tierra de los planos cartográficos históricos tuvieron que fraccionarse o rotarse para encajarlos en los planos cartográficos de las líneas de costa actual. A cada una de las líneas de costa vectorizadas se les asignaron atributos específicos incorporados

a los cálculos; los valores negativos corresponden a erosión, mientras que la acreción corresponde a valores positivos.

El error estimado fue inferior al 5%, un valor que se correlaciona con los errores obtenidos en investigaciones anteriores que utilizan métodos similares.

3.1.1. Cartagena de Indias, Colombia

Tal y como se ha indicado previamente, se procedió a la vectorización de cartografía histórica correspondiente a diferentes períodos, con el objetivo de determinar y cuantificar los cambios en la línea de costa de las bahías internas y externas de Cartagena de Indias. El más antiguo, de 1780, pertenece al Archivo General de la Nación Colombiana de la Biblioteca Nacional. Su título completo es Plano del puerto de Cartagena de Indias y está registrado en "fmapoteca_224_fagn_19." Según la información del registro, este plano se publicó como la lámina número 47 del atlas titulado "A Complete Historical, Chronological, and Geographical American Atlas, being a Guide to the History of North and South America, and the West Indies, by H.C. Carey & I. Lea in Philadelphia, 1822". El mapa de la figura 3.1, dibujado a mano con lápiz y tinta, está orientado por una rosa de los vientos y muestra las bahías y las principales fortificaciones de Cartagena de Indias de la época. Los números junto a las líneas de la rosa de los vientos indican la batimetría de la bahía. Las dimensiones del mapa original son 59 x 92 cm.

El plano moderno muestra la línea de costa elaborada a partir de fotografías aéreas obtenidas de Google Earth durante el año 2018. La figura 3.2 corresponde con la composición de las fotografías aéreas utilizadas. La figura 2.12 complementa la información durante el análisis del caso de estudio introduciendo los datos batimétricos actuales de la bahía.

La georreferenciación del mapa histórico y de las imágenes actuales a través de QGis permitió el acceso a la información remota a través de los servidores de Datos OGC del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). El IGAC utiliza como sistema de referencia (datum) oficial de Colombia el MAGNA-SIRGAS (Marco de Referencia Geocéntrico Nacional, una densificación del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas).

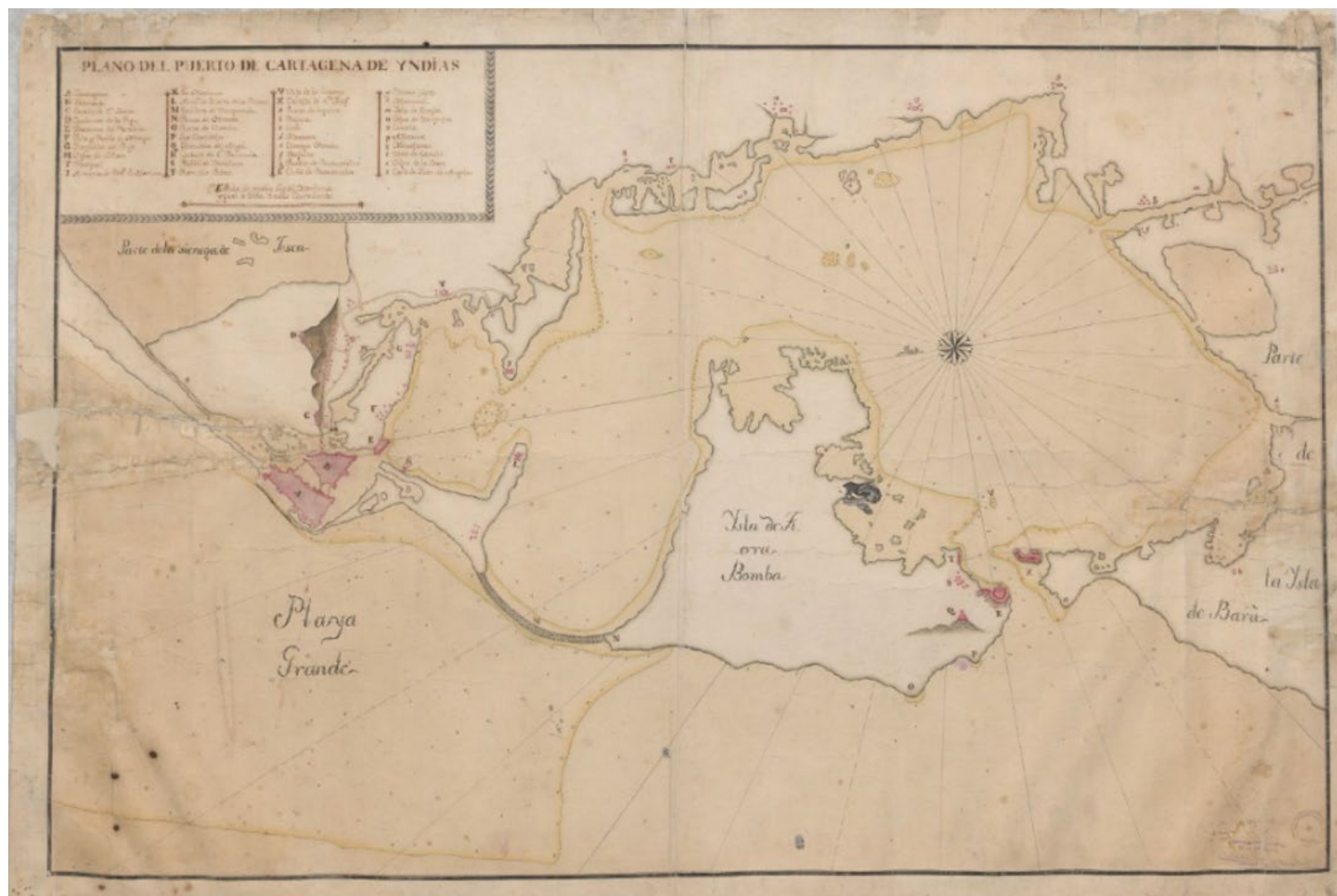


Figura 3.1: Mapa Histórico, Cartagena de Indias, 1780.

Fuente: Biblioteca Nacional de Colombia, Archivo General de la Nación.

http://catalogoenlinea.bibliotecanacional.gov.co/custom/web/content/mapoteca/fmapoteca_224_fagn_19/fmapoteca_224_fagn_19.htm



Figura 3.2: Mapa Actual, Cartagena de Indias, 2018.
Fuente: Google Earth

3.1.2. Rio de Janeiro, Brasil

Para el segundo caso de estudio, el proceso de georreferenciación de la cartografía histórica y las imágenes aéreas actuales también se llevó a cabo mediante el software de SIG de código abierto QGIS. Esta herramienta permitió acceder y procesar información geoespacial remota alojada en el servidor de datos OGC de Brasil, utilizando el sistema de referencia geodésico oficial MAGNA-SIRGAS y el datum SAD 69/IBGE.

Como mapa histórico de referencia, se seleccionó el documento cartográfico titulado "Plano del Puerto de Río de Janeiro", elaborado en 1869 por la Sección Hidrográfica de Madrid en base a publicaciones técnicas brasileñas e inglesas editadas por orden del Almirantazgo. Este recurso forma parte de los fondos documentales de la Biblioteca de la Dirección General del Instituto Geográfico y Estadístico, con la referencia archivística n°4294, Costa del Brasil. La carta náutica está montada sobre tela con dimensiones 94 x 59 cm.

Por su parte, la línea de costa actual fue generada a partir de la captura y procesamiento de imágenes aéreas procedentes de Google Earth, correspondientes al año 2022.

La figura 3.3 corresponde al mapa histórico de referencia, datado en el año 1869, mientras que la figura 3.4 presenta la composición fotográfica aérea del mismo sector geográfico, capturada durante el año 2022.

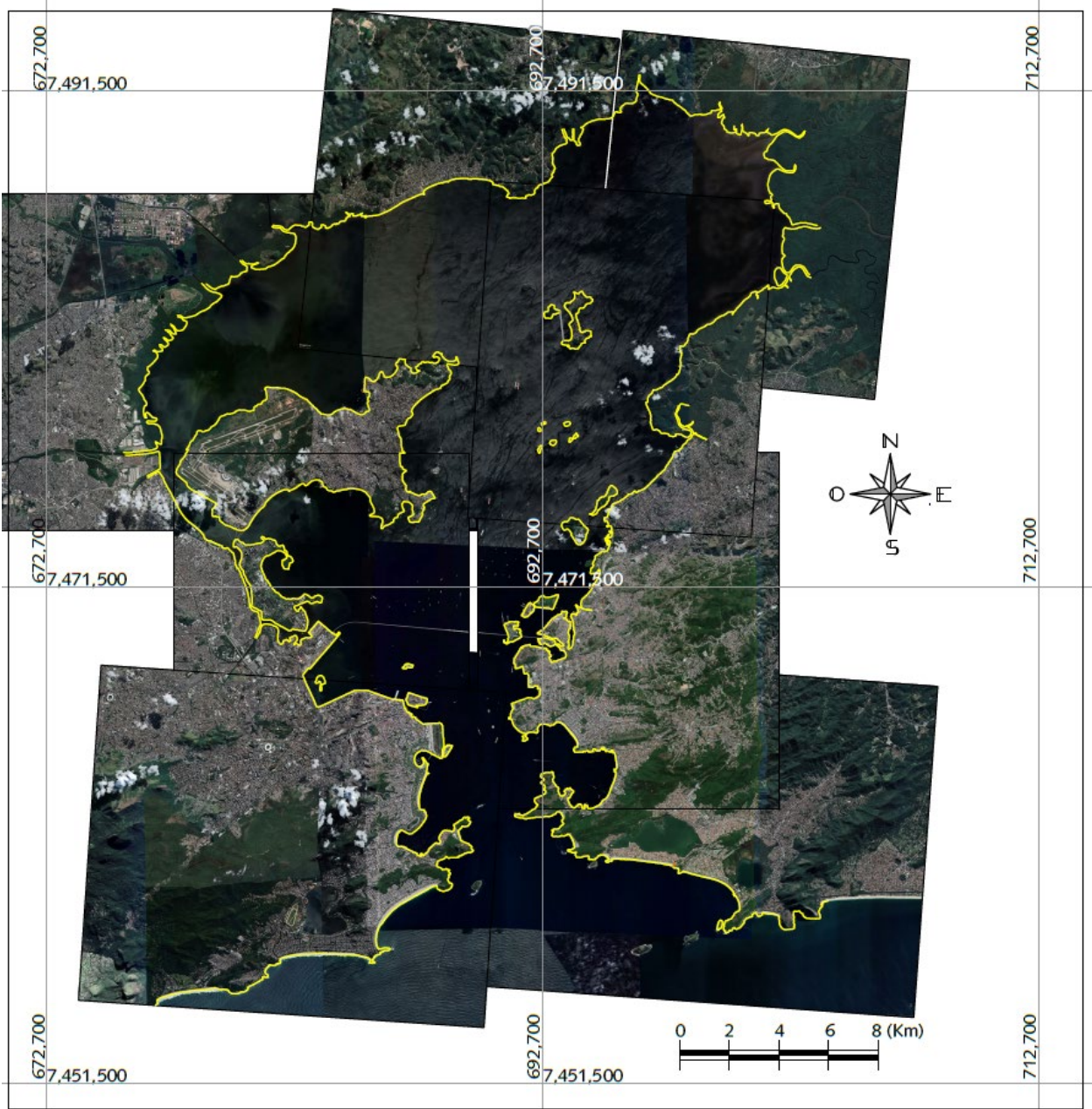


Figura 3.4: Mapa Actual, Río de Janeiro y Bahía de Guanabara, 2022.
Fuente: Google Earth

3.1.3. Nueva Orleans, EE.UU.

Para el tercer caso de estudio, la línea de costa histórica se obtuvo del mapa titulado "Sketch H. Showing the progress of the Survey in Section No. 8 1846 – 1852", perteneciente a la United States Coast Survey, que representa el delta del Mississippi en 1853. Las dimensiones del mapa histórico son 38.1 x 48.2 cm.

En cuanto a la línea de costa actual, esta fue generada mediante el procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas capturadas a través de la plataforma Google Earth, correspondientes al año 2023, abarcando el Lago Pontchartrain y la ciudad de Nueva Orleans.

Para la georreferenciación del área de estudio, la información de coordenadas verticales se encuentra referenciada al North American Datum 1983 (NAD 83), a través de la proyección Transverse Mercator 15R/16R. Estos sistemas de referencia geodésicos y de coordenadas gráficas están basados en el elipsoide del Sistema Geodésico de Referencia "World Geodetic System 1984" (WGS84).

Después de la vectorización fue necesario realizar un ajuste de escala de la línea de costa obtenida del plano de 1853 con un factor de 1,15 para garantizar un empalme que permitiera la comparación con la línea de costa obtenida de las fotografías aéreas de Google Earth obtenida durante el 2023.

La figura 3.5 corresponde al mapa histórico descrito de 1853, mientras que la figura 3.6 representa la línea de costa capturada durante el año 2023.

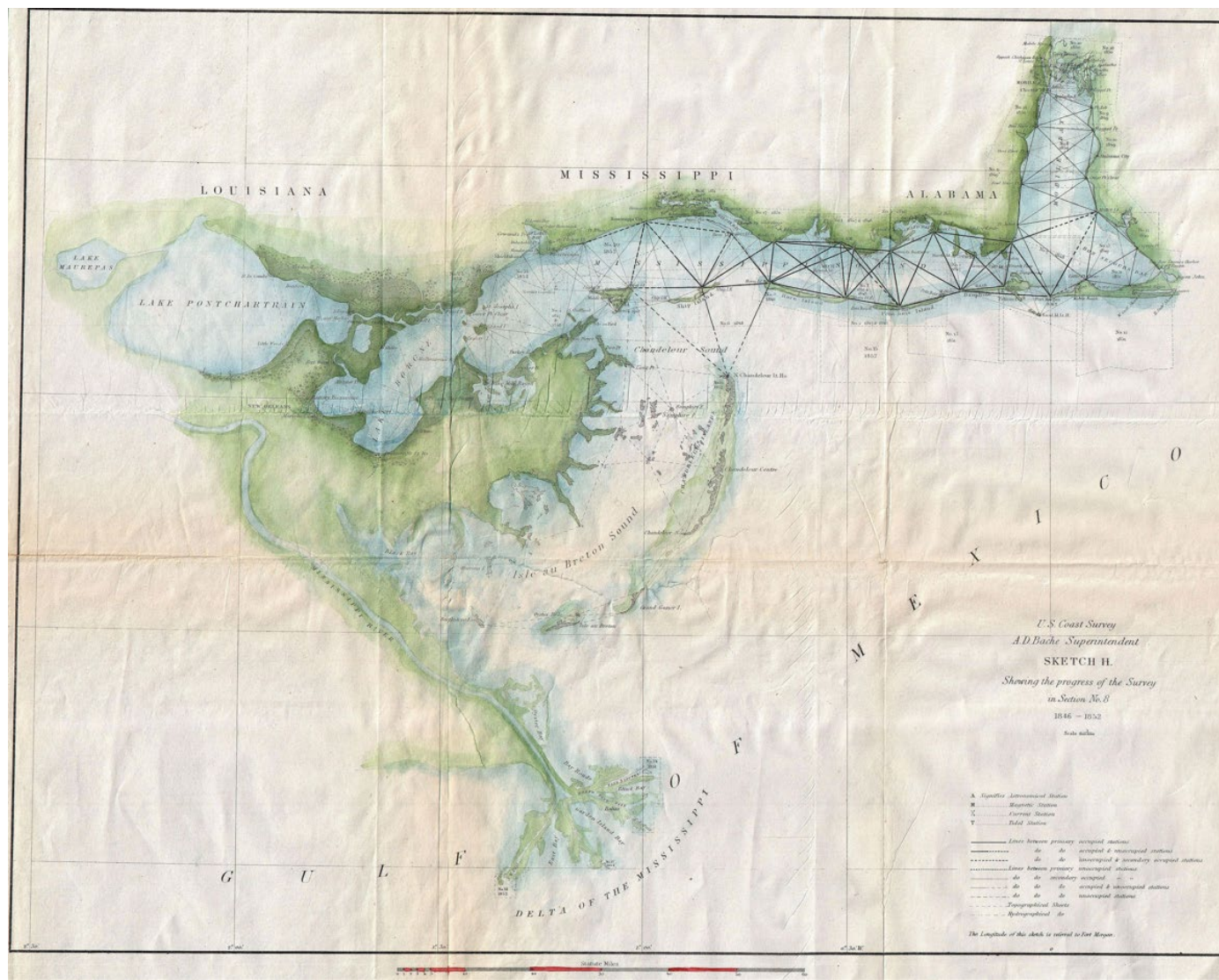


Figura 3.5: Mapa Histórico, Nueva Orleans, Lago Pontchartrain, 1853.
Fuente: United States Coast Survey. Wikimedia Commons. <https://w.wiki/BFVC>

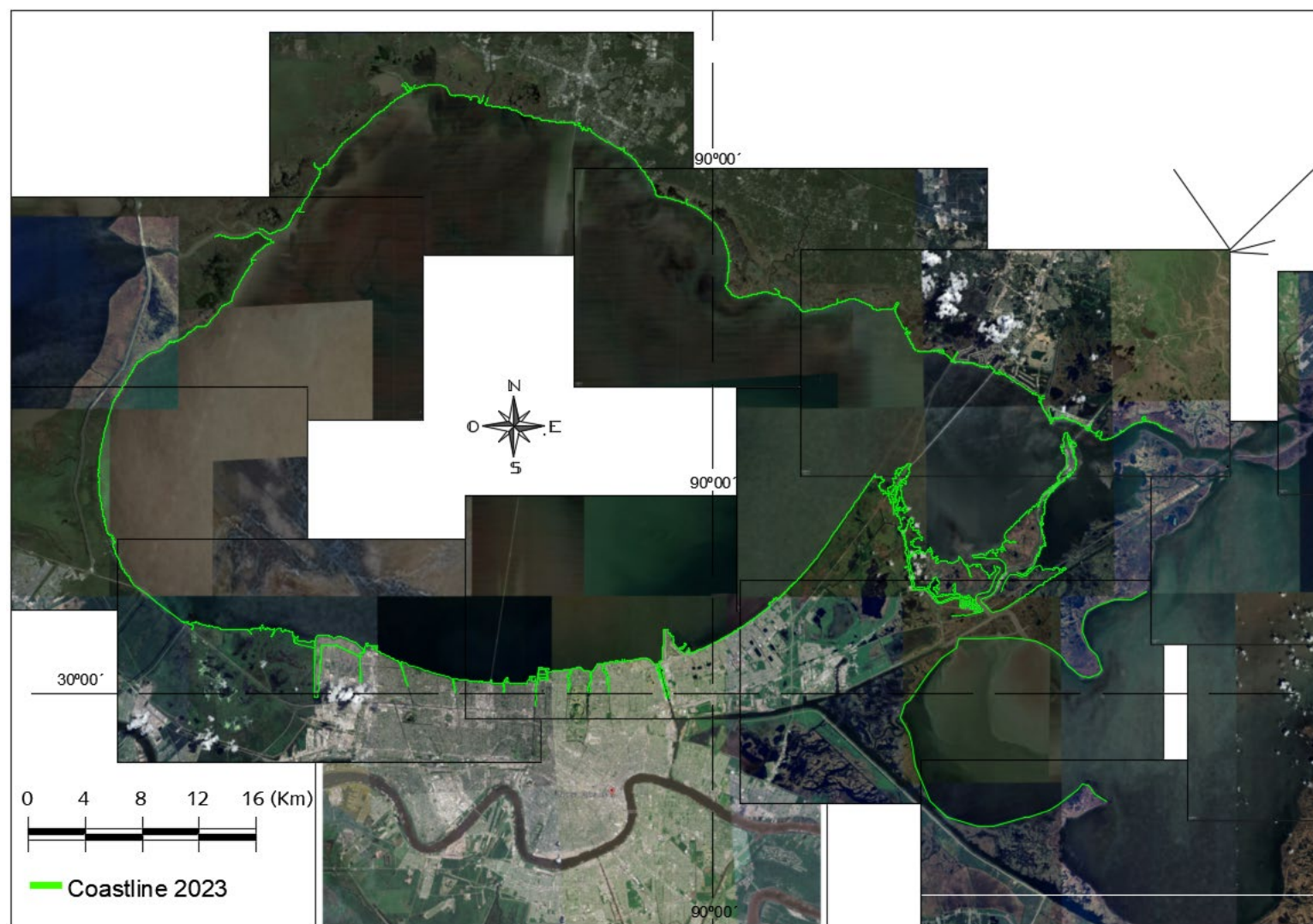


Figura 3.6: Mapa Actual, Nueva Orleans, Lago Pontchartrain, 2023.
Fuente: Google Earth

3.2. Método de comparación de los casos de estudio

Tras obtener los resultados de los tres casos de estudio, y habiendo constatado las diferencias en cuanto a las dimensiones de las áreas y longitudes de línea de costa analizadas, se hizo necesario establecer un método estandarizado de comparación.

Para ello, se procedió a normalizar los resultados mediante su conversión a términos porcentuales. De este modo, se asignó el 100% al área total de cambios, sumando el área de acreción con el área de erosión, para posteriormente calcular el porcentaje correspondiente a cada resultado particular.

En cuanto a las dimensiones de cada ámbito geográfico, el primer caso, correspondiente a la Bahía de Cartagena de Indias, presenta un área de 82 km² y un perímetro costero superior a 75 km. En el segundo caso de estudio, la Bahía de Guanabara en Río de Janeiro, abarca una extensión de 384 km² y 331 km de línea de costa. Mientras que el tercer caso, el Lago Pontchartrain en Nueva Orleans, tiene una superficie de 1.630 km² y una longitud de costa de 290 km.

4. Resultados

Cuando observamos la costa, a menudo nos creemos que esta ha permanecido inalterable durante mucho tiempo; la playa parece que ha estado ahí siempre, y siempre igual, al igual que el acantilado, el peñasco o los escollos. Pero esto no es cierto, la costa es un elemento que está continuamente cambiando, estructurándose en diversidad de formas que, a su vez, siguen cambiando, sensibles a cualquier agente exterior que actúe sobre ellas (Peñas Olivas, 2007).

4.1. Tabulación de resultados de los casos de estudio

A continuación, se presenta la organización tabular de los resultados obtenidos en cada caso de estudio, incluyendo una columna adicional que muestra los valores normalizados en términos porcentuales.

Tabla 4.1: Resultados en porcentaje del primer caso de estudio,
Cartagena de Indias – Colombia
Imperio Español

No,	Zona	Acreeción [km ²]	Erosión [km ²]	Balance [km ²]	Alteración [%]
I	Escollera La Marina	0,04		0,04	2,00%
II	Barrio La Matuna	0,07		0,07	4,00%
III	Escollera Bocagrande	0,05		0,05	3,00%
IV	Isla Manga	0,07		0,07	4,00%
V	Isla Diablo	0,07		0,07	4,00%
VI	Isla Manzanillo	0,03		0,03	2,00%
VII	Isla Cocosolo				
VIII	Isla Facunda		-0,45	-0,45	26,00%
IX	Isla Brujas				
X	Canal del Dique		-	-	-
XI	Isla Abanico		-0,51	-0,51	29,00%
XII	Bocachica				
XIII	Isla Tierrabomba		-0,52	-0,52	30,00%
	Total	0,26	-1,48	-1,22	100%
	Total área alterada		1,74		
	% Alteración	14,94%	85,06%		100%

Tabla 4.2: Resultados en porcentaje del segundo caso de estudio,
Río de Janeiro y Bahía de Guanabara – Brasil
Imperio Portugués

No,	Zona / Segmento	Acreción [km ²]	Erosión [km ²]	Balance [km ²]	Alteración [%]
I	Piratininga	1,08		1,08	1,77%
	Segmento entre la zona I - II	0,30	-0,20	0,10	0,82%
II	Santa Cruz da Barra	0,05	-0,13	-0,08	0,29%
	Segmento entre la zona II - III	0,21	-0,06	0,15	0,44%
III	Seno de Jurujuba	0,11	-1,48	-1,37	2,60%
	Segmento entre las zonas III - IV	1,06	-0,09	0,97	1,88%
IV	Isla Conceição	0,99		0,99	1,62%
V	Isla Mocangue	0,23		0,23	0,38%
VI	Islas Viana y Santa Cruz	0,17	-0,02	0,15	0,31%
VII	Isla das Flores	1,09	-0,15	0,94	2,03%
VIII	Isla do Engenho	0,04	-0,10	-0,06	0,23%
IX	Isla Dos Tavares	0,02	-0,11	-0,09	0,21%
	Segmento entre zona IX - X continente	0,09	-0,03	0,06	0,20%
X	Isla de Paquetá	0,12	-0,25	-0,13	0,61%
XI	Estación Ecológica de Guanabara	0,61	-13,52	-12,91	23,13%
XII	Área del río Surui	1,16	-0,55	0,61	2,80%
XIII	Parque Natural Municipal Barao de Maua	0,15	-1,90	-1,75	3,36%
XIV	Área del Parque Sarapuú	5,11		5,11	8,36%
XV	Isla Gobernador	10,79	-3,99	6,80	24,19%
XVI	Isla Fundación	2,59	-0,24	2,35	4,63%
XVII	Barrio de Cajú	4,01		4,01	6,56%
XVIII	Puerto de Brasco	1,02		1,02	1,67%
XIX	Litoral continental centro	2,52		2,52	4,12%
	Islas del centro de la ciudad	0,25	-0,05	0,20	0,49%
XX	Aeropuerto Santos Dumont	1,26	-0,02	1,24	2,09%
XXI	Fortaleza de Sant Joao	1,30	-0,38	0,92	2,75%
XXII	Playa de Copacabana	1,47	-0,03	1,44	2,45%
Total		37,80	-23,30	14,50	100%
Total área alterada		61,10			
% Alteración		61,87%	38,13%		100%

Tabla 4.3: Resultados en porcentaje del tercer caso de estudio,
Nueva Orleans y Lago Pontchartrain – EE.UU.
Imperio Francés

No,	Zona / Segmento	Acreción [km ²]	Erosión [km ²]	Balance [km ²]	Alteración [%]
I	Aeropuerto Nueva Orleans Lakefront	7,88		7,88	6,92%
II	Universidad de Nueva Orleans				
III	Canal Bayou St John				
IV	Canal Orleans				
V	Canal 17th Street (calle 17)	16,15		16,15	14,19%
VI	Canal Bonnabel				
VII	Causeway (arranque puente sur)				
VIII	Lakefront Trail at Clearview Blvd		-3,15	-3,15	2,77%
IX	Laketown	0,19		0,19	0,17%
X	Parque Wetland Watchers		-19,18	-19,18	16,85%
XI	Gary Rd	1,23		1,23	1,08%
XII	Área de gestión de la fauna salvaje de Manchac		-35,31	-35,31	31,02%
XIII	Desembocadura Río Tchefuncte	-	-	-	
XIV	Mandeville	7,82		7,82	6,87%
XV	Refugio de St Tammany		-4,63	-4,63	4,07%
XVI	Refugio Nacional de Vida Silvestre de Big Branch Marsh	5,43		5,43	4,77%
XVII	Bahía Irlandesa		-12,85	-12,85	11,29%
Total		38,70	-75,12	-36,42	100%
Total área alterada		113,82			
% Alteración		34,00%	66,00%	100%	

4.2. Comparación de los resultados obtenidos

Habiendo normalizado los resultados obtenidos en términos porcentuales, se posibilita la comparación sistemática de los mismos. A tales efectos, la Tabla 4.4 que se presenta a continuación recoge los datos a contrastar.

Tabla 4.4: Comparación resultados de los casos de estudio

Caso n°	Ciudad - Puerto	Imperio	Área de estudio [km ²]	Área alterada [km ²]	Área alterada [%]	Acreción [km ²]	Erosión [km ²]	Acreción [%]	Erosión [%]
1	Cartagena de Indias – Colombia	Español	82	1,74	2,12%	0,26	1,48	14,94%	85,06%
2	Río de Janeiro y Bahía de Guanabara – Brasil	Portugués	384	61,10	15,91%	37,80	23,30	61,87%	38,13%
3	Nueva Orleans y Lago Pontchartrain – EE.UU.	Francés	1630	113,82	6,98%	38,70	75,12	34,00%	66,00%

El área alterada corresponde con la sumatoria del área de acreción y erosión obtenida en cada caso de estudio.

El porcentaje del área alterada es la relación porcentual entre el área alterada y el área de estudio de cada caso.

El porcentaje de acreción es la relación porcentual entre el área obtenida de acreción y el área total alterada.

El porcentaje de erosión es la relación porcentual entre el área obtenida de erosión y el área total alterada.

La evaluación cuantitativa de los tres casos de estudio, expresada en kilómetros cuadrados (km²), evidencia una relación proporcional directa entre el área total alterada y el área total de cada caso de estudio, por tanto, la Bahía de Cartagena de Indias, caracterizada por una extensión sustancialmente reducida (equivalente al 20% del área de la Bahía de Guanabara y aproximadamente al 5% del Lago de Portchartrain) evidencia la menor área de alteración de la investigación.

Por su parte, el análisis comparativo porcentual evidencia una ausencia de correlación lineal entre el área total y el grado de alteración territorial, sugiriendo que la magnitud superficial no determina necesariamente el nivel de intervención ecosistémica.

4.2.1. Influencia de la geomorfología

A partir de la evaluación geomorfológica se evidencian patrones de correlación entre la morfología de la costa y los resultados obtenidos en los tres casos de estudio, en concordancia con la Dialéctica Ambiental descrita en el capítulo dos de esta tesis. En Cartagena de Indias, la línea costera presenta una composición heterogénea con predominio de ecosistemas naturales, donde los manglares y la vegetación tropical ocupan aproximadamente el 65% del territorio litoral, mientras las zonas antropizadas, comprendidas por infraestructura portuaria, desarrollo urbano y otras obras de ingeniería, representan el 35% restante. Esta configuración revela una correlación estadísticamente significativa entre la geomorfología y los procesos erosivo-sedimentarios, con una marcada tendencia a la predominancia de procesos erosivos sobre los de acreción.

La Bahía de Guanabara, por su parte, exhibe una estructura con intensa intervención antrópica, donde los sistemas urbanos ocupan entre el 60-70% del territorio litoral, mientras los ecosistemas naturales, constituidos por formaciones de manglar y vegetación costera, comprenden el 30-40%. La evaluación integrada de la morfología costera muestra una dinámica territorial expansiva, con un 62% de territorios ganados al mar y un 38% asociado a procesos erosivos, evidenciando una transformación sistemática del paisaje costero.

El Lago Pontchartrain representa el caso con mayor simetría, donde los sistemas antropogénicos ocupan entre el 50-60% del territorio, mientras los ecosistemas naturales, compuestos por humedales, vegetación palustre y áreas de transición ecológica, comprenden el 40-50% restante. El análisis morfodinámico revela un balance sedimentario crítico, con un 66% correspondiente a procesos de erosión

costera, principalmente vinculados a zonas de vegetación, en contraste con un 34% de acreción asociado a la intervención antrópica.

4.2.2. Influencia histórica

La reconstrucción histórica reveló mecanismos diferenciados de transformación territorial en cada caso de estudio. El primer caso de estudio, Cartagena de Indias, experimentó un periodo de pobreza de casi un siglo tras el asedio y recuperación de la soberanía española a cargo de Pablo Morillo en 1815, que la sumergió en un período de bloqueos navales y profunda crisis política. La independencia definitiva de 1821 no mitigó inmediatamente su declive, resultando en un proceso de recuperación prolongado durante el cual las estrategias de supervivencia implicaron la explotación sistemática de recursos naturales, con impactos directos en la vegetación litoral y una marcada discontinuidad infraestructural, donde se observa que las obras de ganancia de territorios se construyeron, mayormente, en el periodo colonial y más adelante en el siglo XX.

La Bahía de Guanabara presentó una dinámica de transformación territorial distintiva, marcada por su rol como capital del Imperio Portugués y un proceso de independencia relativamente pacífico a cargo de Pedro I hacia su padre João VI. Esta particularidad generó un contexto sociopolítico más estable que, a pesar de la degradación ecosistémica, permitió una transformación territorial con resultados comparativamente más favorables en términos de ganancia territorial.

El Lago Pontchartrain, por su parte, exhibe una vulnerabilidad geomorfológica inherente, determinada por su ubicación geográfica en una zona de alta actividad de huracanes y tormentas tropicales. Su configuración deltaica intensifica su susceptibilidad a los efectos del cambio climático, que, a pesar de los intentos históricos de protección tanto por parte de las potencias coloniales como de Estados Unidos, lo deja expuesto casi de forma irremediable a los procesos erosivos.

4.2.3. Factores de transformación del paisaje

La investigación reveló mecanismos de transformación territorial comunes en los tres casos de estudio, que originaron procesos de erosión y expansión litoral, con énfasis en las modificaciones antropogénicas. Los vectores de erosión costera se correlacionan significativamente con la degradación de ecosistemas nativos, específicamente en interfaces de manglares, formaciones coralinas y sistemas de humedales. Los procesos de ganancia territorial se generan mediante

intervenciones antrópicas, incluyendo rellenos artificiales, desarrollo de infraestructura estratégica y expansión de zonas portuarias y aeroportuarias.

Los factores singulares de transformación del paisaje, principalmente determinados por la localización específica de cada área de estudio, evidencian variaciones metodológicas en la transformación territorial: Cartagena de Indias presenta un litoral protegido de la acción directa del Mar Caribe, por lo que la modificación de su paisaje litoral es originada en gran medida por actuaciones antropogénicas, destacando la sedimentación inducida por la apertura del Canal del Dique y la construcción de escolleras sumergidas. La Bahía de Guanabara, igualmente resguardada del Océano Atlántico, muestra alteraciones críticas vinculadas a la actividad industrial petrolera, con impactos significativos en la integridad ecosistémica, así como al abandono de navíos y barcos en las aguas cerca de Niteroi. El Lago Pontchartrain exhibe una vulnerabilidad geomorfológica única, determinada por su ubicación en el delta del Río Mississippi, caracterizada por procesos de subsidencia del terreno, simultáneamente su localización geográfica genera una exposición sistemática a eventos meteorológicos extremos. La figura 4.1 es un mapa conceptual que muestra los factores comunes de transformación del paisaje, y los factores singulares de cada caso de estudio.

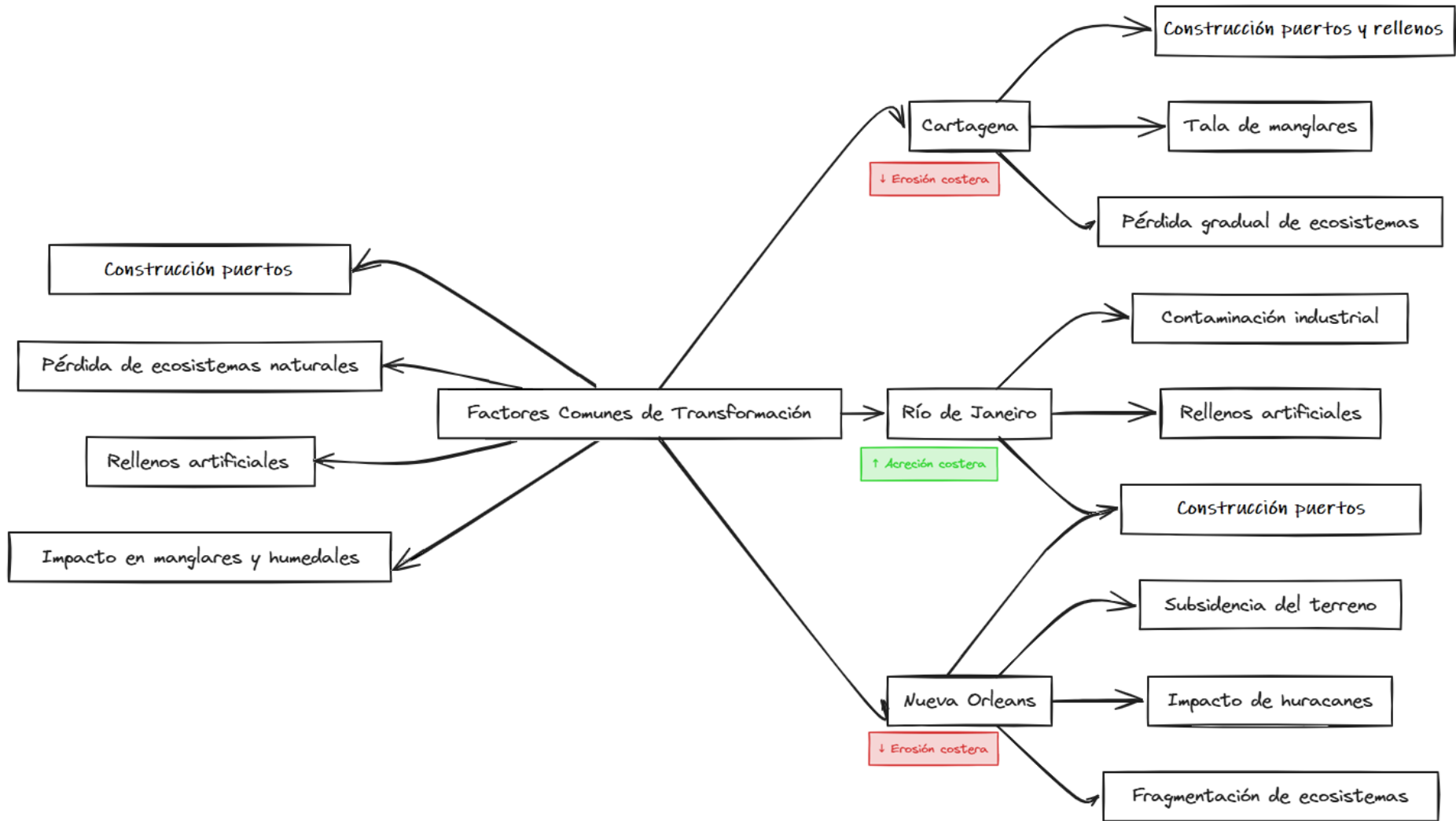


Figura 4.1: Mapa conceptual, factores de transformación del paisaje
Fuente: Elaboración propia

5. Discusión

Los resultados obtenidos en cada caso de estudio fueron analizados en el contexto de investigaciones previas realizadas en los ámbitos geográficos de interés. Esto permitió efectuar comparaciones entre los hallazgos del presente trabajo y los reportados en estudios anteriores, los cuales, si bien no siempre determinaban con precisión las zonas de acreción o erosión dentro de la línea de costa, sí posibilitaban evaluar el comportamiento dinámico del sistema costero, así como su variación en términos de geomorfología, vegetación, granulometría y otros factores relevantes.

Asimismo, la revisión de los antecedentes bibliográficos consultados para cada caso de estudio posibilitó corroborar si la ubicación de las áreas de acreción o erosión identificadas en los análisis realizados se alinea con el desarrollo histórico de cada zona en particular. Estas evidencias demuestran el impacto de la intervención antrópica sobre la línea de costa, proporcionando un claro ejemplo de la variabilidad inherente a este sistema dinámico.

En el Capítulo 2 de la presente investigación, se ha incorporado un apartado específico denominado "resultados, análisis y discusión" dentro de cada uno de los casos de estudio abordados. En dicho apartado, se ha realizado la discusión y el análisis comparativo de los resultados obtenidos en cada ámbito geográfico, contrastándolos con los hallazgos reportados en investigaciones previas.

Los resultados obtenidos en los tres casos de estudio han podido ser corroborados como concordantes, no solo con los hallazgos de estudios anteriores, sino también con el desarrollo histórico de las intervenciones ejecutadas en las líneas de costa, que han generado procesos de acreción o erosión.

En consecuencia, en este capítulo se establece como premisa fundamental que los resultados obtenidos en los tres casos de estudio son coherentes y representativos de la realidad analizada.

Con el objetivo de realizar una comparación sistemática y fundamentada, el alcance geográfico global de la investigación se delimitó al continente americano, mientras que el marco temporal se acotó determinando como inicio la época colonial para todos los casos de estudio seleccionados. Por tanto, los tres ámbitos geográficos analizados comparten características comunes, al localizarse en el mismo continente, haber sido colonias de imperios europeos y ser estudiados en el mismo período histórico. Estas premisas metodológicas garantizan la coherencia y

la posibilidad de efectuar comparaciones adecuadas entre los resultados obtenidos en los diferentes casos de estudio.

Si bien se constatan diferencias en cuanto a las dimensiones de los ámbitos geográficos analizados, con el primer caso de estudio abarcando un área de 82 km², el segundo caso ampliándose a 384 km² y el tercer caso alcanzando 1.630 km², estas variaciones no son representativas en los resultados obtenidos, dado que el presente estudio no contempla el área cubierta por agua en ninguno de los tres casos. Por lo tanto, el análisis comparativo se centra principalmente en la evolución de la configuración de las líneas de costa, más allá de las diferencias en las dimensiones totales de las áreas de estudio. Así, mientras que la Bahía de Cartagena de Indias presenta un perímetro costero de 75 km, la Bahía de Guanabara en el segundo caso de estudio cuenta con 331 km de línea de costa, y el Lago Pontchartrain en el tercer caso abarca una extensión de 290 km. Se evidencia, por tanto, un incremento progresivo de más del triple en la longitud de la línea de costa entre el primer caso y los casos 2 y 3, lo cual podría originar divergencias en cuanto a la mayor zona de posible intervención antrópica o de exposición a los agentes climáticos.

Según la ubicación geográfica, la Bahía de Cartagena de Indias está protegida por la isla de Tierrabomba, mientras que el Casco Antiguo y Bocagrande interactúan directamente con el Mar Caribe.

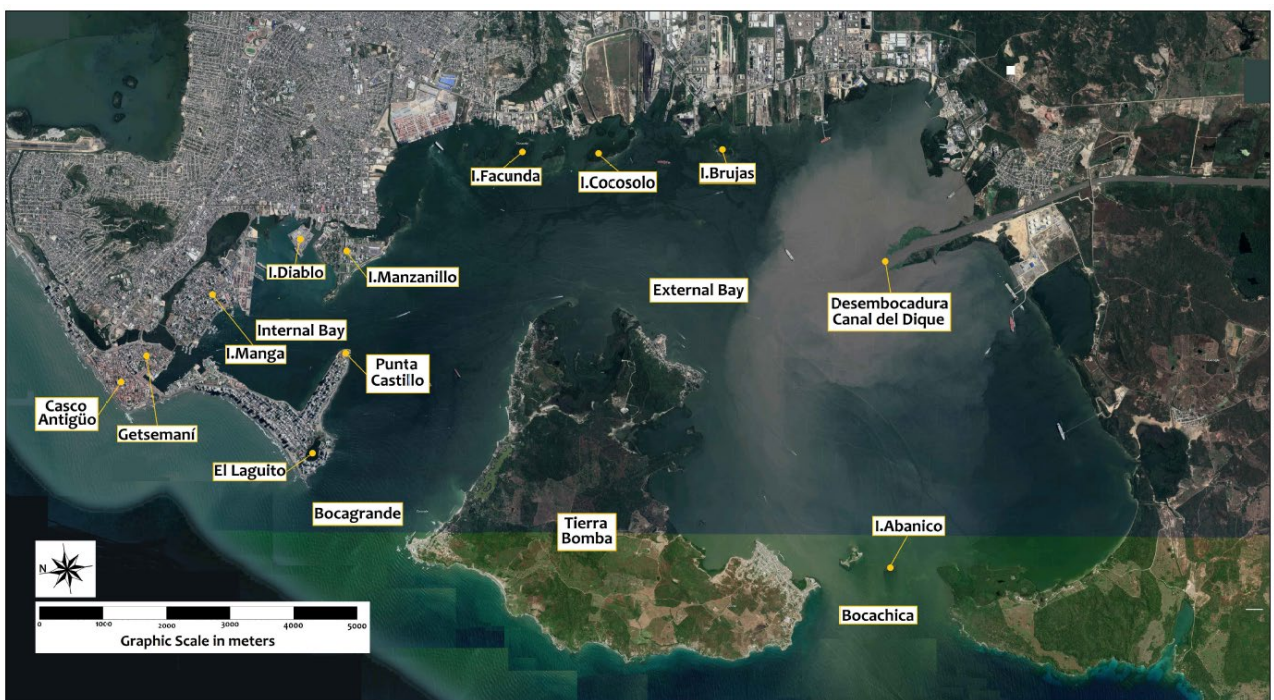


Figura 5.1: Cartagena de Indias, sectores estudiados.
Fuente: Google Earth y elaboración propia

Cartagena de Indias, enfrenta un riesgo moderado de verse afectada por tormentas y huracanes durante la temporada de actividad ciclónica en el Atlántico, que se extiende de junio a noviembre, siendo los meses de agosto a octubre los de mayor incidencia. Aunque la ciudad no se encuentra en la ruta principal de los sistemas tropicales, ha experimentado impactos de algunos de ellos a lo largo de los años, enfrentando potenciales amenazas como vientos fuertes, lluvias intensas, inundaciones costeras y marejadas ciclónicas, que pueden causar daños a la infraestructura y afectar las actividades turísticas.

Por su parte, la Bahía de Guanabara está completamente protegida de la influencia directa del Océano Atlántico, salvo la costa de la playa de Copacabana.



Figura 5.2: Bahía Guanabara y Río de Janeiro, sectores estudiados.
Fuente: Elaboración propia

Aunque Río de Janeiro y la Bahía de Guanabara, ubicadas en la costa sureste de Brasil, no se encuentran en la ruta principal de los huracanes y tormentas tropicales del Atlántico, pueden verse afectadas por algunos sistemas

meteorológicos que se forman en el Atlántico Sur y se mueven hacia el oeste, especialmente durante la temporada de mayor actividad, que se extiende de noviembre a abril, siendo los meses de verano (diciembre a marzo) los de mayor probabilidad de ocurrencia. Los principales riesgos incluyen fuertes lluvias, vientos intensos y posibles inundaciones costeras, especialmente en áreas bajas y cercanas a la bahía, por lo que las autoridades locales y los servicios meteorológicos de Brasil mantienen un monitoreo constante y emiten las alertas necesarias a la población cuando se prevén condiciones meteorológicas adversas.

En el tercer caso de estudio, el Lago de Pontchartrain y la Nueva Orleans, se encuentran parcialmente protegidos del clima oceánico del Mar Caribe debido a su configuración geográfica, ya que está separado del mar abierto por barreras naturales como islas y penínsulas. Sin embargo, la cercanía al Golfo de México los expone a la amenaza de huracanes y tormentas tropicales que pueden atravesar estas defensas y causar graves inundaciones y daños, como se evidenció con el impacto devastador del huracán Katrina en 2005. Por lo tanto, la ubicación geográfica del área brinda cierta protección, pero no la exime por completo de los riesgos asociados a los fenómenos meteorológicos extremos.



Figura 5.3: Lago Pontchartrain y Nueva Orleans, sectores estudiados.
Fuente: Elaboración propia sobre imagen del satélite Landsat 7 (26/04/2000)

La exposición a los riesgos de tormentas y huracanes en las regiones analizadas está determinada por su configuración geográfica. Cartagena de Indias, ubicada cerca del Mar Caribe, enfrenta un riesgo moderado, mientras que la Bahía de Guanabara en Río de Janeiro se encuentra más protegida de la influencia directa del Océano Atlántico. Por otro lado, el Lago de Pontchartrain y Nueva Orleans, si bien cuentan con cierta protección geográfica, siguen expuestos a la amenaza de sistemas meteorológicos extremos que pueden atravesar las barreras naturales.

La evolución de las líneas costeras en los tres casos de estudio analizados ha estado marcada por una compleja interacción entre factores naturales y antrópicos. En la Bahía de Cartagena, su orientación hacia el mar ha sido un factor determinante en la configuración de su línea costera, que ha mantenido un carácter monumental a pesar del crecimiento incontrolado de la construcción. No obstante, se ha registrado un balance negativo de 1.22 km², con una erosión de -1.48 km² debido principalmente a la tala indiscriminada de manglares y praderas, que no alcanza a ser compensada por los rellenos artificiales ni por la construcción de puertos, que han generado una acreción de 0.26 km². En la Bahía de Guanabara, las actividades antropogénicas han provocado importantes alteraciones, como la acumulación de contaminantes, la pérdida de 23.3 km² de manglares y la construcción de infraestructura, dando lugar a un balance positivo de 14.5 km². La acreción de 37.8 km² es atribuible a las intervenciones antrópicas, como la construcción de puertos, aeropuertos y el desarrollo urbano. No obstante, este incremento en la superficie costera no logra compensar plenamente la erosión registrada, principalmente por la pérdida de ecosistemas de manglar. Si bien las obras de ingeniería han generado una expansión de la línea de costa, es importante considerar que la destrucción de hábitats naturales no puede ser reemplazada de manera efectiva por estructuras artificiales. Por lo tanto, el balance neto positivo no debe ocultar la relevancia de la erosión y degradación de los valiosos ecosistemas costeros de la Bahía de Guanabara. Por su parte, el balance final del estudio de la línea de costa del Lago Pontchartrain es desfavorable, con una pérdida neta de 36.42 km² y una preocupante pérdida de superficie de 75.12 km². Las zonas de acreción, que suman 38.70 km², se deben principalmente a proyectos de relleno, construcción de infraestructura y desarrollo urbano, mientras que las áreas de erosión se asocian a procesos naturales y actividades humanas. En conjunto, la intervención antrópica ha afectado significativamente la configuración de estas líneas costeras, con la pérdida de importantes hábitats naturales, lo que evidencia la necesidad de implementar medidas de protección y restauración para preservar el delicado

equilibrio de estos entornos, en palabras concisas, es momento de dar inicio a la etapa del Respeto.

Aunque las ciudades de Cartagena de Indias, Río de Janeiro y Nueva Orleans fueron colonizadas por las potencias europeas de España, Portugal y Francia respectivamente, existen algunas diferencias clave en sus procesos de colonización. Cartagena fue colonizada por España a partir de 1533 y se convirtió en un importante puerto y centro comercial en el Caribe, caracterizándose por la explotación de recursos naturales y mano de obra indígena y africana, así como por ser un centro de la trata de esclavos. La ciudad contaba con imponentes obras de ingeniería a lo largo de su línea de costa, como las escolleras de Bocagrande y La Marina, y fortificaciones diversas para proteger el puerto de ataques. Río de Janeiro, por su parte, fue colonizada por Portugal a partir de 1563 y se centró en la explotación de recursos como el azúcar y el oro, basada en la mano de obra esclava africana. En la costa de Río se construyeron estructuras como el Fuerte de Copacabana y el Fuerte de Santa Cruz, que resguardaban la entrada a la bahía. Por último, Nueva Orleans fue colonizada por Francia a partir de 1718, convirtiéndose en un importante centro comercial y estratégico, con una colonización más enfocada en la exploración y el establecimiento de puestos comerciales, utilizando una combinación de colonos europeos, esclavos africanos e indígenas. En la línea de costa de Nueva Orleans se erigieron fortificaciones como el Fuerte San Carlos y el Fuerte Saint John, que protegían la ciudad de posibles ataques. Cada una de estas ciudades refleja la influencia cultural de la potencia colonizadora en su arquitectura, gastronomía, tradiciones y más.

6. Conclusiones

La integración de los hallazgos actuales con la información previa disponible en la literatura científica permite enriquecer la comprensión del comportamiento y la dinámica de la línea de costa en el área de estudio, contribuyendo a una visión más completa y fundamentada del fenómeno analizado.

Los casos de estudio presentan un análisis histórico de la evolución del paisaje costero en respuesta a las influencias antropogénicas. Aunque en esta tesis no se ha tenido en cuenta el impacto socioeconómico, lo que limita el análisis de las consecuencias de la alteración del paisaje costero para la población circundante a la zona de estudio, esta investigación sí ilustra las consecuencias históricas de diversas decisiones, acciones y políticas sobre el paisaje costero, tanto gubernamentales como sociales. Estas consecuencias tienen implicaciones medioambientales y socioeconómicas que se prolongarán en el tiempo.

Los resultados obtenidos en los tres casos de estudio fueron analizados en el contexto de investigaciones previas realizadas en el área de interés, lo que permitió corroborar que la ubicación de las áreas de acreción o erosión identificadas se alinea con el desarrollo histórico de cada zona en particular, demostrando el impacto de la intervención antrópica sobre la línea de costa.

El término paisaje corresponde a la percepción del ser humano de la naturaleza que le rodea, por tanto, si la intención es referirse a este entorno antes de la intervención humana debemos llamarlo Paisaje Original. Dentro de este concepto, no hay costa natural, está la costa original.

Cartagena de Indias responde claramente a los conceptos de paisaje original, construido y destruido, así como a las etapas de la percepción: sumisión, adaptación, conquista y respeto. Es difícil encontrar ambientes donde la interacción humana ha tenido lugar de acuerdo con el entorno original del ecosistema, este tipo de paisaje construido en Cartagena de Indias se remonta a las construcciones de la colonia. Sin embargo, la defensa y adaptación de estos territorios dio paso a la conquista rápida del entorno y zonas como El Laguito, Bocagrande y el centro histórico de Cartagena de Indias pertenecen al tipo de Paisaje Destruído.

Los cambios de la línea costera de Cartagena, y el estudio de la afectación del oleaje y la deriva costera en la región se han documentado en casos particulares y

períodos específicos por diferentes ingenieros e investigadores del tema. El primer caso de estudio realizó una comparación tanto de la bahía interna como de la externa, dividiendo el análisis por sectores de forma que pudieron corroborarse con investigaciones anteriores, evidenciando que las tendencias cuantificadas están en concordancia con resultados previos.

La evolución natural de la ciudad se debió a su orientación hacia el mar. Mantuvo su naturaleza monumental y el crecimiento incontrolado de la construcción en masa. La línea costera de Cartagena de Indias presenta un balance negativo de 1.22 km², cuyo principal origen es la tala indiscriminada de manglares y praderas, que no alcanza a ser compensada por los rellenos artificiales ni por la construcción de puertos. El estudio realizado muestra una tendencia erosiva de la línea costera de Cartagena de Indias, así como en otras costas del Caribe colombiano (Molina-M, , *et al.*, 1992). La propensión erosiva se sitúa especialmente en la parte sur de la bahía generando la necesidad de una pronta actuación en esta zona para determinar las acciones que deberán ejecutarse con el fin de restituir los arrecifes de coral, manglares y pastos de praderas de forma que se alcance un equilibrio positivo que cambie la tendencia mostrada por esta y demás investigaciones.

La preocupación actual por la sostenibilidad y el respeto por el medio ambiente es el punto de inflexión para el siguiente nivel de paisaje, así que esperemos que Cartagena de Indias consiga adaptarse y evolucionar hacia el Paisaje Reconstruido.

La costa oriental de Río de Janeiro y el litoral de la Bahía de Guanabara muestran una clara correlación con los conceptos de paisaje delineados en esta investigación. El Paisaje Original representa el paisaje que existía en la bahía antes de la llegada de los portugueses al continente. Durante el periodo colonial se produjo el Paisaje Construido, en el que las construcciones de la población estaban en armonía con los espacios naturales. El Paisaje Destruído es la consecuencia de las interacciones antropogénicas que se han producido en el último siglo. Estas interacciones se han visto agravadas por la acumulación de contaminación y la construcción de edificios a lo largo del litoral. El concepto de Paisaje Reconstruido puede considerarse reflejado en la obra de Burle Marx, que intenta restaurar la armonía del litoral mediante elementos entrelazados.

El interior de la bahía de Guanabara está protegido de los efectos de las tormentas, principalmente debido a la presencia de olas de tormenta del sureste que se dejan sentir intermitentemente en las ensenadas de Flamengo y Botafogo y en los bordes

de las playas de Niteroi. En la isla Gobernador, el efecto combinado de las olas generadas por el viento del nordeste y la acumulación de agua puede provocar la inundación de la playa. Sin embargo, en términos generales, los cambios en la línea de costa en la zona de estudio son en gran parte el resultado de las actividades antropogénicas que se han llevado a cabo desde el período colonial.

Las actividades antropogénicas han provocado importantes alteraciones en la bahía de Guanabara debido a la acumulación de contaminantes, lo que ha dado lugar a la pérdida de zonas de manglares, la construcción de vertederos, puertos, aeropuertos, la adición de arena a las playas y otras estructuras artificiales que han ganado terreno al mar. Además, tales estructuras han facilitado la integración de las islas con el continente.

Una comparación entre las partes occidental y oriental de la bahía revela que la mayor acreción del litoral se produjo en la parte occidental de la ciudad de Río de Janeiro. La utilización de la Bahía de Guanabara para fines industriales, petrolíferos, petroquímicos y navales, junto con las inversiones en puertos y astilleros, transformaron el litoral este de Río de Janeiro en la región más significativa y más afectada de Brasil. Sin embargo, la detección y el registro de las modificaciones del litoral también incluyen áreas que se han perdido, especialmente en el norte (zonas XI, XII y XIII), donde una parte importante de los manglares se ha visto afectada, ya sea por la destrucción o por la contaminación procedente de los ríos que drenan la Baixada Fluminense. La parte oriental de la bahía se caracteriza por la presencia de litorales artificiales en Niteroi y São Gonzalo.

La costa este de Río de Janeiro y las costas de la Bahía de Guanabara presentan un saldo positivo de 14,5 km² (+37,8; -23,3), como resultado de los vertederos artificiales para la construcción de puertos y aeropuertos, o de las playas que necesitan un suministro constante de arena para mantener su uso principal, el turismo. Sin embargo, no hay que olvidar la importancia de la superficie perdida durante el periodo estudiado, que es de 23,3 km² y corresponde a la superficie afectada por la pérdida de manglares. Afortunadamente, en los últimos años se han puesto en marcha proyectos para proteger estas zonas.

La ciudad de Nueva Orleans, y en general la costa del Lago Pontchartrain responden a los conceptos de paisaje natural/original, construido y destruido. Siendo los naturales aquellos que se localizaban antes de la llegada de los europeos a la Desembocadura del Río Mississippi, mientras que los construidos

corresponden con las primeras construcciones realizadas por los colonos en el ámbito de la defensa de las costas. El paisaje destruido corresponde a aquellas construcciones portuarias que no respetan el entorno del paisaje existente, así como a la pérdida de vegetación. Afortunadamente la población mundial ha demostrado interés en los últimos tiempos, en aras de respetar los ecosistemas, lo que permitirá a futuro alcanzar el paisaje reconstruido en el área estudiadas.

Para el caso de estudio n°3, Lago Pontchartrain y Nueva Orleans, las zonas de acreción identificadas se corresponden con proyectos de relleno, construcción de infraestructura y desarrollo urbano, mientras que las áreas de erosión se asocian a procesos naturales como la subsidencia, el aumento del nivel del mar y el impacto de huracanes, así como a actividades humanas como la fragmentación y degradación de los humedales.

La investigación de este tercer caso de estudio muestra una preocupante pérdida de superficie que asciende a 75,12 km², y que sobre todo se localiza en los ecosistemas de humedales y pantanos de la región. Además de los factores descritos en el párrafo anterior, se evidencia que las actividades humanas como la construcción de infraestructura, la contaminación y el desarrollo urbano, han fragmentado y degradado aún más los ecosistemas.

En general, la investigación ha dejado en evidencia que la intervención humana a lo largo del tiempo ha afectado significativamente la costa del Lago Pontchartrain, con la pérdida de importantes ecosistemas de humedales, pantanos y bosques.

En términos generales, el análisis comparativo de los tres casos de estudio permite observar que las diferentes ciudades portuarias analizadas responden a una evolución conceptual que abarca desde el Paisaje Natural/Original, pasando por el Paisaje Construido y el Paisaje Destruído, hasta llegar incluso, aunque en menor medida, a un Paisaje Reconstruido con proyecciones de actuaciones futuras más respetuosas con el medio ambiente. De manera análoga, estos conceptos pueden vincularse con las cuatro fases de percepción de la naturaleza: Sumisión, Adaptación, Conquista y Respeto.

Asimismo, en los tres casos de estudio, las zonas de acreción identificadas se corresponden con proyectos de relleno, construcción de infraestructura y desarrollo urbano, mientras que las áreas de erosión se asocian a la degradación y pérdida de la vegetación, ya sea de manglares, pastos de pradera o humedales. Estos hallazgos evidencian el impacto de la intervención antrópica sobre la configuración de las

líneas de costa, reflejando la transición desde un Paisaje Natural hacia un Paisaje Construido o Destruído, con las consecuentes implicaciones ambientales.

Tras realizar los análisis individuales de los tres casos de estudio y la posterior comparación de los resultados obtenidos, tanto en términos de acreción y erosión, como de las actividades que han generado dichos procesos, se puede dar respuesta a la hipótesis planteada en la presente investigación: "¿La evolución del paisaje litoral de una ciudad costera que fue colonia europea entre los siglos XV-XVII está significativamente influenciada por el origen del imperio colonial que llegó a sus costas durante ese período?".

La respuesta a dicha hipótesis es contundente: no, el origen del imperio colonial no es un factor determinante en la alteración del paisaje litoral. Por el contrario, este fenómeno es inherente al comportamiento de nuestra especie en términos generales, y no depende del origen de la población que llega a un determinado territorio. Las tendencias de destrucción de los paisajes, ocasionadas por la construcción masiva y descontrolada, no hacen referencia a un origen determinado, sino a la propia naturaleza humana, la cual, en algunos casos, parece no haber evolucionado completamente hacia la etapa del respeto por el entorno.

En conclusión, el análisis diacrónico de la evolución de las líneas de costa en los tres casos de estudio permite afirmar que la alteración del paisaje litoral responde a patrones comunes, independientemente del origen colonial de las poblaciones que han intervenido en estos territorios. Estos hallazgos evidencian la necesidad de adoptar enfoques de planificación y gestión territorial más sostenibles, que logren armonizar el desarrollo humano con la preservación de los ecosistemas costeros.

7. Futuras líneas de investigación

Tras el desarrollo de la presente investigación doctoral, se abren nuevas líneas de estudio a explorar. En primera instancia éstas pueden plantearse desde dos enfoques principales: basados en el imperio colonizador o en el país/territorio colonizado.

La primera línea de investigación se centraría en el análisis de los demás imperios que tuvieron presencia en el continente americano durante la época colonial, y, por tanto, los futuros trabajos podrían evaluar los puertos coloniales de los imperios británico y holandés, como por ejemplo Nieuw Ámsterdam (Nueva York), Boston y Filadelfia en EEUU, Bridgetown en Barbados, Kingston en Jamaica, Nassau en Bahamas, Willemstad en Curazao o Paramaribo en Surinam, entre otros.

Por otra parte, la segunda línea de investigación podría enfocarse en los países o territorios que fueron colonias ya estudiados durante la investigación de esta tesis doctoral que permita ampliar el espectro de los resultados obtenidos, haciendo énfasis en aquellos puertos que hayan experimentado cambios significativos en su litoral. Algunos ejemplos relevantes serían los puertos de Santa Marta y Riohacha en Colombia, San Francisco y Nueva York en Estados Unidos, o Salvador y Recife en Brasil.

También, podrían generarse nuevas investigaciones con el fin de profundizar el análisis de la evolución de la línea de costa de otros territorios colonizados por los imperios español, portugués y francés, que fueron clave para el desarrollo de las colonias, tales como, La Habana en Cuba, Portobelo en Panamá, Veracruz en México, Callao en Perú, Valparaíso en Chile, entre otros. La investigación podría, incluso, extrapolarse más allá del continente americano, abarcando otros puertos coloniales de los imperios mencionados en otras regiones del mundo.

Así mismo, el concepto de *Paisaje Oculto* emerge como una línea de investigación innovadora en la clasificación paisajística, vinculado directamente a las transformaciones ecosistémicas inducidas por el cambio climático. Este fenómeno se caracteriza por la revelación de territorios sumergidos previamente, cuya emergencia se produce por la reducción de niveles hídricos en embalses y superficies acuáticas, exponiendo ecosistemas históricamente ocultos y permitiendo una comprensión dinámica de la evolución territorial.

Referencias

- Abreu, M. d. A., 2006. *Evolucao Urbana de Rio de Janeiro*. 4 ed. Rio de Janeiro: Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos (IPP).
- Aguiló, M., 1999. *El Paisaje Construido, Una Aproximación a la idea de Lugar*. s.l.:Castalia S.A..
- Aguiló, M., 2013. *Qué significa Construir. Claves conceptuales de la Ingeniería Civil*. Madrid, España: Abada Editores, S.L..
- Álvarez-Rogel, Y. & Conesa García, C., 2018. Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España). *GeoFocus (Artículos)*, Volumen 21, pp. 101-118.
- American Society of Civil Engineers - ASCE, 2021. Structural design and construction of the Lake Pontchartrain Causeway. *Journal of Bridge Engineering*, 26(4), pp. 123-130.
- American Society of Civil Engineers (ASCE), 2013. The Lake Pontchartrain Causeway Bridge, 1956-2012. *Journal of the Louisiana Section*, 21(3).
- Andrade - Amaya, C. A., Ferrero, A.; León, H.; Mora, H., y Carvajal, H., 2017. Sobre cambios en la línea de costa entre 1735 y 2011 y la subsidencia en la Bahía de Cartagena de Indias, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(158), pp. 94-106.
- Andrade, C.; Thomas, Y.; Login, S.; Parra, C.; Kunesch, S.; Menanteau, L., and Velasco, S., 2004. Aspectos morfodinámicos de la bahía de Cartagena de Indias. *Boletín Científico No. 22 - CIOH*, Volumen 22, pp. 90-104.
- Andreatta, V., Chiavari, M. P. & Rego, H., 2009. O Rio de Janeiro e a sua orla: história, projetos e identidade carioca. *Coleção Estudos Cariocas*, pp. 1-16.
- Anon., 2023. *New Orleans Lakefront Airport*. [En línea] Available at: <https://lakefrontairport.com/about/>
- Arauna Júnior, J. T., de Campos, T. M. P. & Pires, P. J. M., 2014. Sediment Characteristics of an Impacted Coastal Bay: Baía de Guanabara, Rio de Janeiro. *Journal of Coastal Research*, Volume 71, p. 41-47.
- Baptista Neto, J. A., Smith, B. & McAllister, J., 1999. Sedimentological evidence of human impact on a nearshore environment: Jurujuba Sound, Rio de Janeiro State, Brazil. *Applied Geography*, pp. 153-177.
- Barbosa, M. C. & Soares de Almeida, M. d. S., 2001. Dredging and disposal of fine sediments in the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Hazardous Materials*, 85(Issues 1-2), p. 15-38.
- Barras, J. A., Bernier, J. C. & Morton, R. A., 2008. *Land Area Change in Coastal Louisiana: A Multidecadal Perspective (from 1956 to 2006)*, Virginia : Pamphlet to accompany.

- Bastos, A., 1994. *Estudo da Variação Morfológica a partir de Parfis de Praia em Piratininga, Niterói-RJ, Brasil. Relatório final da Disciplina Estágio de Campo IV-D.*, Rio de Janeiro: UFF.
- Beerman, E., 2000. *EL TRATADO DE SAN ILDEFONSO (1800) Y EL ÚLTIMO GOBERNADOR ESPAÑOL DE LA LUISIANA*, Las Palmas de Gran Canaria, España: Cabildo Insular de Gran Canaria.
- Blasco, J. A., 2014. *Urban Networks*. [Online] Available at: <https://urban-networks.blogspot.com/2014/08/nueva-orleans-y-el-primer-jazz-musica-y.html>
- Bollfrass, K., 2022. *Coastal Wetlands Planning Protection & Restoration Act. 32nd Priority Project List*. s.l., CPRA, p. 109.
- Burkett, V. R., Zilkoski, D. B. & Hart, D. A., 2003. Sea-Level Rise and Subsidence: Implications for Flooding in New Orleans, Louisiana.. In: F. I. C. o. C. Z. M. a. E. i. t. M. East, ed. *U.S. Geological Survey Subsidence Interest Group Conference: proceedings of the Technical Meeting, Galveston, Texas, November 27-29, 2001*. Texas: U.S. Geological Survey, pp. 63-70.
- Campanella, R., 2002. *Time and Place in New Orleans: Past Geographies in the Present Day*. Gretna, Louisiana: Pelican Publishing.
- Campanella, R., 2012. New Orleans: A Timeline of Economic History. *New Orleans New Opportunities - New Orleans Business Alliance*,, p. 6.
- Campanella, R., 2018. Turning Water Into Land: How New Orleans Created the Lakefront Neighborhoods, 1926-1934. *New Orleans Times-Picayune*, 13 April.
- Campello Torres, P. H., 2018. Avenida Brasil - Everything Passes By Those Who Don't See?: the formation and occupation of a highway suburb in Rio de Janeiro (1930-1960). *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e regionais*, 20(2).
- Canedo de F. Pinheiro, E., 2015. *Chapter 7: Guanabara Bay a look at a History*. 1 ed. Rio de Janeiro(Museu do amanhã): Edições de Janeiro.
- Castillo Charris, M. A. & Gamarra Mendoza, E. A., 2014. Análisis multitemporal de la línea de costa en la isla de Tierrabomba y proyección del mapa de inundación por aumento del nivel medio del mar. *Boletín Científico CCCP*, Volumen 32, p. 15.
- City of Mandeville City Hall, 2024. *Mandeville, a Historic Lakefront Community*. [Online] Available at: <https://www.cityofmandeville.com/>
- Coalition to Restore Coastal Louisiana, 1999. *No Time to Lose: Facing the Future of Louisiana and the Crisis of Coastal Land Loss*. Louisiana: Coalition to Restore Coastal Louisiana.
- Coastal Protection and Restoration Authority (CPRA), 2023. *Maurepas (River Reintroduction into Maurepas Swamp Project)*. [Online] Available at: <https://coastal.la.gov/news/maurepas/>

- Coastal Protection and Restoration Authority of Louisiana, 2017. *Louisiana's Comprehensive Master Plan for a Sustainable Coast*, Baton Rouge, LA : State of Louisiana.
- Colin, A., 1900. *La geologie apud*. Paris: Colomb, G & C. Houlbert.
- Colten, C. E., 2005. *A River and Its City: The Nature of Landscape in New Orleans*. Berkeley, California: University of California Press.
- Colten, C. E., 2005. *An Unnatural Metropolis: Wrestling New Orleans from Nature*. s.l.:LSU Press.
- Contreras Delgado, C., 2005. Pensar el paisaje. Explorando un concepto geográfico. *Trayectorias*, II(17), pp. 57-69.
- Corominas, J., 1983. *Breve diccionario etimológico de la lengua castellana*. Tercera ed. Madrid, España: Editorial Gredos S.A..
- Couvillion, B. R. et al., 2011. *Land Area Change in Coastal Louisiana from 1932 to 2010*, Virginia: Pamphlet.
- Crehana , 2024. [En línea]
Available at: <https://www.crehana.com/blog/estilo-vida/tipos-de-paisajes/>
- Crespo-Francés, J. A., 2014. *Presentación digital del Escenario de la Contienda. Cartografía y Evolución de la Defensa de Cartagena de Indias..* Madrid, Colegio Mayor Universitario San Pablo CEU de Madrid.
- Curry, M. G., Holder, S. W. & Burglass, B. D., 1982. *Final Jefferson Parish, Louisiana. Coastal Zone Management Program*, Metairie, Louisiana: Jefferson Parish Environmental and Development Control Department. Louisiana Department of Natural Resources (CPRA).
- Dawdy, S. L., 2008. *Building the Devil's Empire (edition unavailable)..* s.l.:The University of Chicago Press.
- de Oliveira, J. F. & Muehe, D., 2013. Identificação de áreas de sedimentos compatíveis na plataforma continental interna para recuperação de praias entre as cidades de Niterói e Macaé. *Revista de Gestão Costeira Integrada - Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 13(1), pp. 89-99.
- deFrance, S. D. & Kennedy, J. R., 2019. The Finny Tribe: How Coastal, Cosmopolitan New Orleans Satisfied an Appetite for Fish. *International Journal of Historical Archaeology*, 2020(24), p. 367–397.
- del Campo Francés, Á., 1951. Paisaje y Paisajismo. *Revista de Obras Públicas*, pp. 261-274.
- Department of Louisiana Wildlife & Fisheries, 2024. *Louisiana Wildlife & Fisheries*. [Online]
Available at: <https://www.wlf.louisiana.gov/page/st-tammany-wildlife-refuge>
- Departamento del Interior de los Estados Unidos, 2024. Salazar participa en el proyecto de restauración de pantanos en la Reserva Nacional de Vida

- Silvestre Big Branch en celebración del Día Nacional de las Tierras Públicas. *Departamento del Interior de los Estados Unidos*.
- Díaz González, G., 2004. Evolución estacional de la línea de costa. El caso de Cartagena de Indias. *Ingeniería Civil. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX*, 134(0213-8468), pp. 47-54.
- Díaz González, G., 2006. La costa caribe colombiana. Consideraciones base para el estudio de sus afectaciones. *Ingeniería Civil. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX*, Volumen 143, pp. 133-140.
- Díaz, J. M. M. & López, D. I. G., 2003. Historic changes in the abundance and distribution of seagrass beds in the cartagena bay and neighboring areas (Colombia). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras. INVEMAR*, Volumen 32, pp. 57-74.
- Díaz-M., J. & Gómez-López, D., 2003. Cambios históricos en la distribución y abundancia de praderas de Pastos Marinos en la Bahía de Cartagena y áreas aledañas (Colombia).. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, Volumen 32, pp. 57-74.
- Diez, J. J., 1999. Morphodynamics of Spanish Cantabrian Rias. *Journal of Coastal Research*, 15(4), pp. 1072- 1082.
- Diez, J. J., 2001. La transformación del paisaje litoral. *O.P. Ingeniería y territorio*, II(Nº 55 El Paisaje en la Ingeniería), pp. 38-47.
- Dixon, T. H., Ferretti, A., Amelung, F. & Novali, F., 2006. Subsidence and flooding in New Orleans. *Nature*, 441 (7093), pp. 587-588.
- Editorial, E., 1957. Puente sobre el lago Pontchartrain, el puente más largo del mundo. *Informes de la Construcción*, Volume 10, p. 65–73.
- Eichler, P. P. B. ; Eichler, B. B. ; Pimenta, F. M. ; Pereira, E. R. M.; Vital, 2014. Evaluation of Environmental and Ecological Effects Due to the Accident in an Oil Pipe from Petrobras in Guanabara Bay,. *Open Journal of Marine Science*, Volume 4, pp. 298-315.
- Ellis, S., 1981. *St. Tammany: L'autre Cote du Lac*. s.l.:Pelican Pub Co Inc.
- EPA,. D. d. C., 2018. *Establecimiento Público Ambiental: Observatorio para la Gestión Ambiental del Distrito de Cartagena de Indias, Bolívar*.. [En línea] Available at: <http://observatorio.epacartagena.gov.co/>
- Fernandes, P. G. Neto, J.A.B.; Vieira, K.S.; de Almeida, M.P.; Correa, T.R.; de Freitas Delgado, J.; da Fonseca, E.M. 2020. Multitemporal analysis by remote sensing of the evolution of coastal Line of Guanabara Bay. *S&G Journal*, Volume 15 , pp. 59-69.
- Fernández Christlieb, F., 2014. El nacimiento del concepto de paisaje y su contraste en dos ámbitos culturales: el viejo y el nuevo mundo. *Perspectivas sobre el paisaje*.
- Flocks, J., Kindinger, J., Marot, M. & Holmes, C., 2009. Sediment Characterization and Dynamics in Lake Pontchartrain, Louisiana. *Journal of Coastal Research*, SI(54), p. 113–126.

- Flocks, J., Kulp, M., Smith, J. & Williams, S. J., 2009. Review of the Geologic History of the Pontchartrain Basin, Northern Gulf of Mexico. *Journal of Coastal Research*, SI(54), p. 12–22.
- Foner, E., 1988. *Reconstruction: America's Unfinished Revolution, 1863-1877*. New York, USA: Harper & Row.
- Fonseca, E. M. d. Neto, J. B.; Silva, C. G.; Mc Alister, J. J.; Smith, B. J.; Fernandez, M.A. 2013. Stormwater impact in Guanabara Bay (Rio de Janeiro): Evidences of Seasonal Variability in the Dynamic of the Sediment Heavy Metals. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, Volume 130, pp. 161-168.
- García Navarro, J., 2002. *Arquitectura Marítima (o Construir en el Límite)*. Viña del Mar, Chile, Universidad de Valparaíso.
- Gerson, B., 2000. *História das Ruas do Rio e da sua liderança na história política do Brasil*. Rio de Janeiro: Lacerda Editores.
- Godoy, J. M. Moreira, I.; Bragança, M.; Wanderley, C.; Mendes, L., 1998. A study of Guanabara Bay sedimentation rates.. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Volume 227, pp. 157-160.
- Gómez Pretelt, W. & Carvajal Díaz, A. F., 2011. Estrategia para la defensa y ubicación de las fortificaciones de la plaza fuerte de Cartagena de Indias en el Siglo XVIII a partir de condiciones Océano-Atmósfera y variaciones morfológicas en la línea de costa.. *Saber, Ciencia y Libertad*, 6(2), p. 14.
- Gómez Zotano, J., Riesco Chueca, P., Álvarez Sala, D. & Rodríguez Rodríguez, J., 2010. *Marco conceptual y metodológico para los paisajes españoles*. Sevilla: Consejería de Obras Públicas y Vivienda, Centro de Estudios Paisaje y Territorio.
- González Rodríguez, S. V., Negro Valdecantos, V., del Campo, J. M. & Torrodero Numpaque, V., 2024. Comparing the Effects of Erosion and Accretion along the Eastern Coast of Río de Janeiro and Guanabara Bay in Brazil. *Sustainability*, 16(5728).
- González Rodríguez, S.V. Valdecantos, V.N.; González, J.J.D.; del Campo, J.M.; Martín-Antón, M., 2021. Comparing the Effects of Erosion and Accretion along the Coast of Cartagena De Indias, Colombia. *Journal of Coastal Research*, 37(6), p. 1204–1223.
- Hernández Fernández, S. & Hernández Alonso, S., 2013. *Actuaciones en los ríos: Mejoras ambientales y paisajísticas*. Galicia, s.n.
- IAN, 2017. *The Development Process and Methods for the Guanabara Bay Report Card*, s.l.: Integration and Application Network.
- Igual, J. M., 1965. El Paisaje geográfico: comercio exterior y empleo.. *Estudios Turísticos*, Volumen 6, pp. 5-49.
- imaginariodejaneiro.com, 22. *IMAGINA Río De Janeiro, Guía de la Ciudad Maravillosa*. [Online] Available at: <https://imaginariodejaneiro.com/la-ciudad-de-rio-de-janeiro/historia-de-rio-de-janeiro/> [Accessed 22 12 2022].

- INGEOMINAS, 2001. *Geología de las planchas 23 Cartagena y 29-30 Arjona*, Bogotá D.C. - Colombia: Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear.
- INVEMAR, I. n. d. I. M. y. C. J. B. V. d. A., 2017. *Análisis de vulnerabilidad marino costera e insular ante el cambio climático para Colombia.*, Santa Marta, Colombia: s.n.
- Kjerfve, B.; Ribeiro, C. H.; Dias, G. T.; Filippo, A. M.; y Quaresma V. D, S., 1997. Oceanographic characteristics of an impacted coastal bay: Baía de Guanabara. *Continental Shelf Research*, 29 May, 17(13), pp. 1609-1643.
- Krauss, K. S. G. K. R. C. J. W. W. a. H. S., 2017. *Performance measures for a Mississippi River reintroduction into the forested wetlands of Maurepas Swamp*, s.l.: Coastal Protection and Restoration Authority.
- Lins-de-Barros, F. M., Sauzeau, T. & Varela Guerra, J., 2019. Historical evolution of seafront occupation in France (Bay of Biscay) and Brazil (Rio de Janeiro) face to coastal erosion vulnerability and risks (19th - 21th centuries). *Confins - Revue franco-brésilienne de géographie*, Volume 39, pp. 1-36.
- L'Isle, G. d., 1718. *Library of Congress*. [Online] Available at: <http://hdl.loc.gov/loc.gmd/g3701s.ct003028>
- Louisiana Hometown. Hometown Productions - Broadcasting & Media, 2013. *New Orleans Lakefront Airport Terminal Rededication*. [En línea] Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=0Y9E3jSHxVc>
- Lowry, R., 1891. *A history of Mississippi : from the discovery of the great river by Hernando DeSoto, including the earliest settlement made by the French under Iberville, to the death of Jefferson Davis*. Michigan: Jackson, Miss. : R.H. Henry & Co..
- Martín-Antón , M. Valdecantos, V.N.; del Campo, J.M.; López-Gutiérrez, J.S.; y Esteban, M.D., 2016. Review of coastal Land Reclamation situation in the World. *Journal of Coastal Research*, Volume 75, pp. 667-671.
- Martín-Antón, M., 2018. *Obras públicas, evolución y paisaje costero. De la Situación en España al Gigantismo Asiático*, Madrid - España.: Universidad Politécnica de Madrid.
- Martinez, R. J., 1951. *The Story of the River Front at New Orleans*. New Orleans, LA: Pelican Publishing Company.
- Martin, L.; Suguio, K.; Flexor, J.-M.; Dominguez, J.M.L.; y, de Azevedo, A.E.G., 1984. *Evolucao da Planicie Costeira do Rio Paraiba do Sul (RJ) durante o quaternario: Influencia das Flutuacoes do Nivel do Mar*, Rio de Janeiro: Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia.
- Mazda, Y., Michimasa, M., Miyagi, T. & Kobashi, D., 2002. Coastal erosion due to long-term human impact on mangrove forests. *Wetlands Ecology and Management*, Volume 10, pp. 1-9.
- Melo, E., 1993. *The Sea Sentinels Project: Watching Waves in Brazil*. New Orleans, VIII symposium on coastal and ocean management coastal zone 93, pp. 505-517.

- Merrill, B. D., 2021. Condition Evaluation of the JFK Causeway Post-tensioned Segmental Bridge. *ASPIRE*, Volume Summer, pp. 20-23.
- Mogollón Vélez, J. V., 2012. El Dique en el Siglo XIX: del Canal de Totten al Ferrocarril Cartagena - Calamar. *Publicaciones Unitecnológica*, Volumen 26.
- Molina-M, A., Molina-M, C. & Chevlllot, P., 1992. La percepción remota aplicada para determinar la circulación de las aguas superficiales del Golfo de Urabá y las variaciones de su línea de Costa. Cartagena, Colombia.. *Boletín Científico No. 11 Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - CIOH.*, Volumen 11, pp. 43-58.
- Moraes, P., 2022. Relações espaciais como morfogênese do território da Avenida Brasil, no Rio de Janeiro. *EURE*, 48(143), pp. 1-23.
- Muehe, D. C., 1975. *Análise Ambiental no Sistema Costeiro Sul-oriental do Estado do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. Pós Graduação em Geografia*, Rio de Janeiro: UFRJ.
- Muehe, D., Figueiredo Lima, C. & Lins de Barros, F. M., 2006. *Erosão e progradação no litoral brasileiro*. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.
- Muehe, D., Figueiredo Lima, C. & Lins de Barros, F. M., 2006. *Erosão e progradação no litoral brasileiro*. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.
- Muehe, D. & Lins-de-Barros, F. M., 2016. Chapter 14: The Beaches of Rio de Janeiro. In: A. d. F. K. Short, ed. *Brazilian Beach Systems*. Switzerland: Springer International Publishing Switzerland.
- Muehe, D., Lins-de-Barros, F. M., Bulhoes, E. & Azevedo Klumb-Oliveira, L., 2018. Capítulo Rio de Janeiro.. In: *Panorama da Erosão Costeira no Brasil*. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente – MMA, p. 759.
- Muehe, D. & Valentini, E., 1998. *O Litoral do Rio de Janeiro: uma caracterização físico-ambiental*. Rio de Janeiro: Fundação de Estudos do Mar FEMAR.
- O'Donnell, J., 2013. *A invenção de Copacabana: culturas urbanas e estilos de vida no Rio de Janeiro (1890 – 1940)*. Rio de Janeiro: Ed. Zahar.
- Peñas Olivas, J., 2007. *Guía Técnica de Estudios Litorales*. Madrid, ESpaña: C.yP. Colegio de Ingenieros de Camino .
- Pereira, R. C. D., 2021. Evolução Urbana Niterói: Da cidade colonial à cidade capitalista. *Eixo Temático 2, 16º SHCU*, Volume 16, pp. 1294-1311.
- Pérez-Chacón E., E., 2005. Unidades de Paisaje: Aproximación científica y aplicaciones. En: *Paisaje y ordenación del territorio*. Las Palmas de Gran Canaria: s.n., pp. 122-135.
- Pérgolis, J., 1998. Tres plazas públicas de Cartagena de Indias.. *Credencial Historia*, Volumen 97.
- Phillips, R. & Meñez, E., 1988. *Seagrasses*. s.l.:Smiths.

- Pires, I. d. O., 2010. Mapeamentos dos manguezais do recôncavo da Baía de Guanabara através da utilização de técnicas de sensoriamento remoto.. *Revista da Gestão Costeira Integrada. Journal of Integrated Coastal Zone Management*, Especial(2), pp. 1-9.
- Rey Pérez, J., 2012. *Burle Marx y su intervención en el paisaje cultural de Copacabana. Documentación, análisis y protección de un patrimonio contemporáneo.*, Sevilla, España: Tesis Doctoral.
- Robertson, K., Martínez, N. J. & Jaramillo, O., 2003. Amenazas naturales asociadas al ascenso del nivel del mar en el Caribe Colombiano.. *Cuadernos de geografía. Departamento de Geografía - Universidad Nacional de Colombia.*, XII(1-2), pp. 135-153.
- Rocha , P. d.; P.L.F.; da Silva, G.C., Jr.; Polivanov, H.; Ribeiro, N.M.S., Jr.; Moraes, E.O.; and Sobreira, G.V.A., 1998. Geoelectric survey of Fundão Island, Rio de Janeiro. Brasil. Environmental and Engineering Geophysics, 4rth Meeting, EEGS'98-European Section.
- Rogers, J. D., 2008. Development of the New Orleans Flood Protection System prior to Hurricane Katrina.. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* , 134(5), pp. 602-617.
- Romero Muñoz, D., 2000. *Iribarren, Ingeniería y Mar.* Madrid, España: s.n.
- Ruellan, F., 1944. A evolução geomorfológica da baía de Guanabara. *Revista Brasileira de Geografia*, año IV(4), pp. 103-199.
- Santos, C. L. d., Silvia, M. A. M. & Santore Salvador, M. V., 2004. Dinâmica Sazonal e os Efeitos das Ressacas nas Praias de Niterói (Rio de Janeiro). *Revista Brasileira de Geociências*, September, 34(3), pp. 355-360.
- Saucier, R. T., 1994. *Geomorphology and Quaternary Geologic History of the Lower Mississippi Valley.* 1 ed. Urbana-Champaign(Illinois): U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Scarano, F. R., 2002. Structure, Function and Floristic Relationships of Plant Communities in Stressful Habitats Marginal to the Brazilian Atlantic Rainforest. *Annals of Botany*, Volume 90, pp. 517-524.
- Seed, R. B. et al., 2006. *Investigation of the Performance of the New Orleans Flood Protection Systems in Hurricane Katrina on August 29, 2005.* New Orleans: National Academies Press.
- Segovia, R., 2001. Atlas histórico de Cartagena de Indias: Paso a paso, la construcción civil, militar y religiosa de la ciudad.. *Credencial Historia No. 143.*
- Segovia, R., 2009. *Las fortificaciones de Cartagena de Indias: Estrategia e historia.* s.l.:El Ancora Editores; Sexta Edición edition (December 1, 2009).
- Silva Amador, E., 2012. *Bacia da Baía de Guanabara : características geoambientais, formação e ecossistemas.* Rio de Janeiro: Interciência.
- Silva Amador, E. d., 1997. *Bahía de Guanabara e Ecossistemas Periféricos: Homem e Natureza.* Rio de Janeiro: Edição do Autor.

- Silva, A. C. P., 2018. Ser “carioca” / ser “fluminense”: la creación de identidades por las fronteras político-administrativas en el espacio sudamericano.. *Acta Hispánica*, pp. 85-103.
- Silva, A. L. C. d., 2006. *Comportamento Morfológico e Sedimentológico do Litoral de Itaipuaçu (Maricá) e Piratininga (Niterói), RJ, nas últimas três décadas. Dissertação de Mestrado*, Niterói, Brasil: UFF.
- Silva, A. L. C. d., Silva, M. A. M. & Santos, C. L. d., 2009. Morfodinâmica e a estabilidade da praia de Piratininga, Niterói (RJ). *Revista Brasileira de Geociências*, 39(4), pp. 685-694.
- Silva, M. A. M., 1999. Um estudo sobre a dinâmica das praias de Niterói (Baía de Guanabara, RJ). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 71(4), p. 962 – 967.
- Silva, M. A. M. et al., 2016. The Beaches of Guanabara Bay in Rio de Janeiro State. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 17(2), pp. 205-225.
- Smyth, C. G. & Royle, S. A., 2000. Urban landslide hazards: incidence and causative factors in Niteroi, Rio de Janeiro State, Brazil. *Applied Geography*, p. 95–117.
- Soares da Costa, G., 2022. *Niterói, 19th century: An analysis of its historical cartography*. Madrid, España & Curitiba, Brasil, s.n.
- Souza Moraes, L. E., Marcolino Gherardi, D. F. & Garcia Fonseca, L. M., 2009. Análise multi-temporal da cobertura vegetal do tipo manguezal da APA de Guapimirim (RJ) através do processamento de imagens TM-LANDSAT. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, pp. 4615-4622.
- St. Tammany Parish Police Jury, 1992. *St. Tammany Parish Local Coastal Program*, St. Tammany Parish: s.n.
- Steyer, G. D.; Cretini, K.F; Piazza, S.; Sharp, L.A.; Snedden, G.A.; and Sapkota, S.; 2010. *Hurricane Influences on Vegetation Community Change in Coastal Louisiana*. Lafayette: USGS National Wetlands Research Center.
- Stouthamer, S. & van Asselen, S., 2015. *Drivers of delta subsidence*. The Hague, the Netherlands, s.n.
- Thompson, G., 2022. *Rio de Janeiro Galeão Airport - from Start to Finish*. [Online] Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=Wg4ebs-gXi0>
- Törnqvist, T. E. et al., 2008. Mississippi Delta subsidence primarily caused by compaction of Holocene strata. *Nature Geoscience*, 1(3), pp. 173-176.
- U.S. Army Corps of Engineers, N. O. D., 2021. *Lake Pontchartrain & Vicinity, Louisiana General Re-Evaluation Report with Integrated Environmental Impact Statement*, St. Charles, Jefferson, Orleans, and St. Bernard Parishes, Louisiana: s.n.
- U.S. Fish and Wildlife Service, 2007. *Comprehensive Conservation Plan and Environmental Assessment for Big Branch Marsh National Wildlife Refuge*,

- St. Tammany Parish, Louisiana*, New Orleans: U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Southeast Region.
- Usner Jr., D. H., 1992. *Indians, Settlers, and Slaves in a Frontier Exchange Economy. The Lower Mississippi Valley Before 1783*. Williamsburg, Virginia: University of North Carolina Press, Omohundro Institute of Early American History and Culture.
- Van Asselen, S., Erkens, G., Keogh, M. E. & Stuurman, R., 2023. Shallow-subsidence vulnerability in the city of New Orleans, southern USA. *Hydrogeology Journal*, p. 867–889.
- Vera-Cruz, D., 1972. Chapter 80: Artificial Nourishment of Copacabana Beach. In: *Coastal Engineering*. Vancouver, Canada: s.n., pp. 1451-1463.
- Verdonschot, P.; Spears, B.; Feld, C.; Brucet, S.; Keizer-Vlek, H.; Borja, A.; Elliot, M.; Kernan, M.; and Johnson, R., 2013. A comparative review of recovery processes in rivers, lakes, estuarine and coastal waters. *Hydrobiologia*, Volume 704, pp. 453-474.
- Vernette, G., Lesueur, P. & Klingebiel, A., 1984. Evolución morfológica y sedimentológica de la flecha litoral del Laguito, (Bahía de Cartagena - Colombia). *Boletín Científico CIOH*, Volumen 5, pp. 3-23.
- Visser, J. M., Sasser, C. E., Chabreck, R. H. & Linscombe, R., 1998. Marsh Vegetation Types of the Mississippi River Deltaic Plain. *Estuaries*, 21(4), pp. 818-828.
- Visser, J. M., Sasser, C. E., Chabreck, R. H. & Linscombe, R. G., 2002. The impact of a severe drought on the vegetation of a subtropical estuary. *Estuaries*, 25(6A), pp. 1184-1195.
- Waggoner & Ball Architects, 2013. *Greater New Orleans. Urban Water Plan*, New Orleans: s.n.
- Walker, A., 1856. *Jackson and New Orleans. An authentic narrative of the memorable achievements of the American army, under Andrew Jackson, before New Orleans, in the winter of 1814, '15*. Cincinnati: New York, J. C. Derby; Cincinnati, H. W. Derby.
- Witcher, T. R., 2017. Lake Pontchartrain Causeway. *Civil Engineering*, 87(5), pp. 42-45.
- Wolff, J., Shelley, E. & Hoferlin, D., 2021. *From the Gutter to the Gulf: Legible Water Infrastructure for New Orleans*. New Orleans, ACSA, pp. 167-174.
- Yin-can, Y., 2017. Marine Geo-Hazards in China.. *Science Direct*, pp. 269-296.

Apéndices:
Crterios de Calidad

Artículo n°1
Comparing the Effects of Erosion and Accretion
along the Coast of Cartagena De Indias,
Colombia

Comparing the Effects of Erosion and Accretion along the Coast of Cartagena De Indias, Colombia

Silvia V. González Rodríguez*, Vicente Negro Valdecantos, J. Javier Diez, José M. del Campo, and Mario Martín Antón

Grupo de Investigación Medio Marino
Costero y Portuario y otras Áreas Sensibles
Universidad Politécnica de Madrid
Madrid 28040, España



www.cerf-jcr.org



www.JCRonline.org

ABSTRACT

González Rodríguez, S.V.; Valdecantos, V.N.; Diez, J.J.; del Campo, J.M., and Antón, M.M., 2021. Comparing the effects of erosion and accretion along the coast of Cartagena De Indias, Colombia. *Journal of Coastal Research*, 37(6), 1204–1223. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

This research paper is a study of the transformation of the coastal landscape. It is based on the modification of the coastline as the symbolic and dynamic border between the continent and the ocean. The methodology is a comparison of two cartographic maps from different time periods. The first map is from the General Archive of the Colombian Nation published in 1822, and the second is the result of an assembled image based on aerial photographs obtained with Google Earth during 2018. The procedure is divided into three stages. In the first stage, the maps were georeferenced using QGIS and then vectorized using the design software AutoCAD. In the second stage, a superimposition was made to identify the changes in the coastline. Finally, the differences in areas were calculated and quantified by grouping them as appropriate in accretion or erosion. The obtained results suggest that the erosion in Cartagena de Indias during the evaluated period is higher with respect to the area of accretion obtained. A discussion comparing these results with different studies previously performed was had. It was concluded that Cartagena de Indias lost land, where its majority corresponds to mangroves and coral reefs.

ADDITIONAL INDEX WORDS: *Littoral, coastline, colonial cartography, aerial photography, accretion, erosion, colonial maritime works.*

INTRODUCTION

Human beings are in contact with the surrounding environment, which provides them with water, food, shade, and shelter to fulfil their needs. Initially, the struggle to survive was fought between humans and the natural environment. The victory of humanity was essentially because of its ingenuity, its community life, and the social capacity developed to communicate and collect the memory of its culture. The evolution of humans in the art of building and being in the world (Aguiló, 2013) transforms the environmental perception in a more transcendental setting because it has been allowed to take elements of nature and turn them into tools, to understand the environment and turn it into territory, to inhabit the site and impregnate it with experiences and give it a soul, which converts it into a place (Negro, Martín, and del Campo, 2018).

Four phases occur in the perception of the physical environment, which transform it from site into place: submission, adaptation, conquest, and respect. The phases follow the principle used by Alexander Pope in landscape and garden design in the Epistle IV, To Richard Boyle, Earl of Burlington in 1731, which referred to the adaptation of the designs to the context in which they are found, also known as

genius loci in Roman, *i.e.* the spirit protecting the place (Bateson, 1961).

The first phase in which humans fear nature is known as submission, and cities are built away from the sea's shoreline to be protected from storms and rough weather, while also watching for pirates and preventing invasions. After humans become sedentary by observing nature and modifying its customs, it moves to the next phase, adaptation, in which natural resources are optimized and begin to coexist within the framework of the city. Then, humans take over the territory, demonstrating power and dominion over nature from the greatness of its construction works in the conquest phase. In this phase, humanity has knowledge, training, tools, and technology at its disposal to overcome obstacles imposed by the environment; such enormous accomplishments are a clear statement of the human position on the planet. The excess of superiority threatens ecosystems, and, in some cases, leads to the disappearance of plant and animal species. The last phase, respect, implies greater awareness for a life in equilibrium with the environment, where engineering must be managed based on environmental sensitivity and social equity.

The aim of this paper is to study the Cartagena de Indias, Colombia, as a historically relevant place where humanity has transformed the landscape from original into constructed, and even exceeding and destroying in some places. After identifying the areas that have experienced the greatest transformation because of anthropogenic actions, a measurement will be made, categorizing them by erosion or accretion accordingly. Other aspects related to the transformation of the landscape will be

DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-20-00129.1 received 13 September 2020; accepted in revision 18 February 2021; corrected proofs received 14 May 2021.

*Corresponding author:

silviaviviana.gonzalez.rodriguez@alumnos.upm.es

©Coastal Education and Research Foundation, Inc. 2021

considered, such as problems derived from land use and different practices that will impact the landscape and future developments. To this end, it is necessary to be clear that “the coast is an element that is constantly changing, structuring itself in a variety of ways that, in turn, continue to change, sensitive to any external agent acting on it” (Peña, 2007).

Original, Constructed, and Destructed Landscape

French geographer, Roger Brunet, defines landscape as what is seen of the country (Fernández, 2014). Whereas “paese” and “pittura” are consistently used in the 15th century, the Italian term, “paesaggio,” (landscape) did not appear until the 16th century; as far as it is known, the term “paisaje” (landscape) did not appear in the Spanish language until 1708 (Corominas, 1983).

In 2000, the European Landscape Convention defined landscape as “a zone or area as perceived by local people or visitors, whose visual features and characteristics are the result of the action of natural and/or cultural (that is, human) factors” (Olmo, 2014). Consequently, it is thought that without the presence of humans, the notion of landscape will not exist as it is, as the same definition relates to the perception of one with the existence of the other, and it is an anthropocentric concept.

The investigator Angel del Campo y Frances indicates that, “the word ‘landscape’ is not ancient, it began being used in paintings, precisely when nature became a fundamental subject of paintings. Before, it was the background to figures and was not yet a landscape; when it became such, the figures disappeared or were a complement to painted nature” (del Campo y Frances, 1951). Consequently, the landscape is a recent anthropocentric concept, resulting from the interaction of the human beings with nature and its contemplation. In other words, neither nature itself is a landscape nor is the person situated within nature is a landscape; the definition of landscape appears as knowledge and a product of observation.

Humanity has been interacting and building its new environment; therefore, it becomes necessary to identify the differences between original, constructed, and destructed landscapes. This paper takes the following definitions framed within the littoral panorama made by Martín (2018).

- (1) Original landscape: to defend exceptional places within an objective concept and dimension; it responds to the concept of protected in certain bibliographic sources.
- (2) Constructed landscape: combines nature and construction works, illustrating the evolution of the natural environment as a social and cultural force; it responds to the concept of cultural in certain bibliographic sources.
- (3) Destructed landscape: abandoned, the disappearance of the natural and territorial area of the city and nature in all its aspects from social to environmental, from sustainable to communications.

For some centuries now, this natural landscape (original) has been evolving toward a humanized landscape, losing its accumulated information over millions of years. In every moment, the landscape is a photograph of this process,

continuous, varied, and in dynamic equilibrium (Hernández and Hernández, 2013).

Historical Description

During the 17th century, the Hispanic monarchy constructed its most important ports for defense, among which the Cartagena de Indias Bay stands out, along with Havana and the Isthmus of Panama. These places were constantly attacked by Franco-English pirates (Gómez and Carvajal, 2011).

The port city of Cartagena de Indias began the construction of Santo Domingo bulwark (Figure 1), and its first fortification in 1614 ended in 1635. The military engineer Cristóbal de Roda and the engineer Francisco de Murcia were the project managers (Segovia, 2009). These fortifications were rebuilt, reinforced, and restructured by the military engineer, Juan de Herrera y Sotomayor, between 1703 and 1735 and later by the military engineer and mathematician, Antonio de Arevalo, between 1742 and 1798 (Bateman, 1970; Segovia, 2001). “The fortifications of Cartagena de Indias and its bay increased, transformed and recovered over the years. They have become the very essence of the city and are the main feature of its strong character” (Aguiló, 1999). Figure 2 is an indicative illustration of the chronological construction of the fortifications in Cartagena de Indias.

Following the war of independence in 1810, the Free State of Cartagena was counter attacked by the Spanish general Pablo Morillo in 1815. At that time, the city was defended by rebels until their deaths, and since then it has been known as the Heroic City. Nevertheless, the city was evacuated and remained in Spain’s power until 10 October 1821. The Spaniards were defeated on 10 October that year, and The Cartagena de Indias, the last city to be liberated, became uninhabited. After the 1880s, the recovery from the crisis began slowly. In 1909, the Icacos peninsula received a new use of the land as an industrial area. In 1920, a landing field was built in this area, and around 1930 the peninsula began its development. The various constructions in the bay and adjacent areas in subsequent periods, such as ports of oil, recreational ports, piers, and alterations to the Canal and breakwaters (Lemaitre, 1983a) have undoubtedly changed the coastal landscape (Lemaitre, 1983b).

Cartagena received Spanish, Syrian, Palestinian, Lebanese, Italian, German, and Chinese immigrants fleeing from the Great Depression in 1929.

In 1958, the Spanish engineer PhD Ramón Iribarren, performed a defense study of the Cartagena de Indias coasts (Iribarren, 1958) in which he recommended the construction of a breakwater in the stretch of Bocagrande to improve the situation of Playa Grande. In a second stage, he suggested the execution of two more breakwaters for Santo Domingo and La Tenaza section (Figure 1). The basic idea was to raise the structures on opposite sides from the sands march to stop the transport of these from north to south and thus achieve a stable beach line. Likewise, the project offered variations in bathymetry because of the execution of the proposed breakwaters (Romero, 2000). Iribarren (1958) addressed the problem of sand movement in his project, providing a theoretical approach to the beach profile and the influence of oblique wave components and excessive elevation when the predominant action was

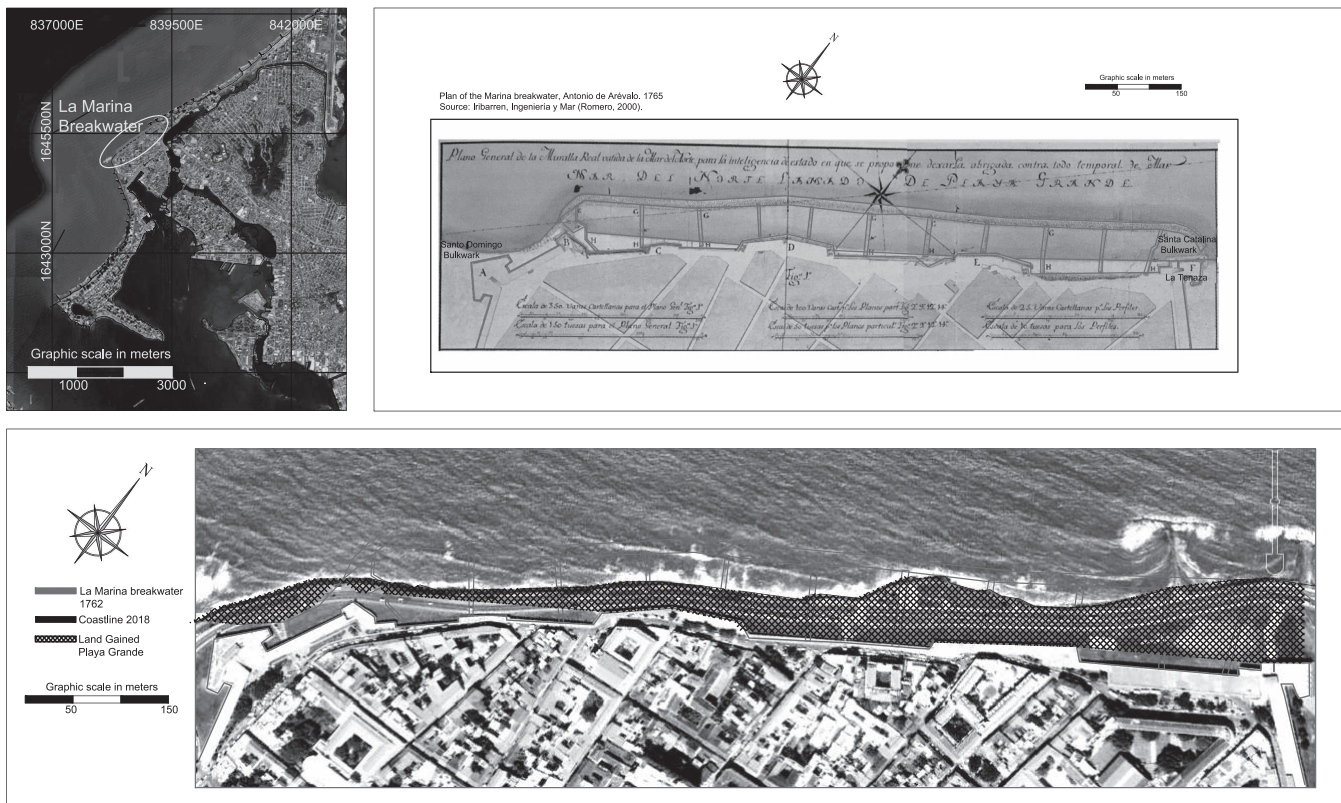


Figure 1. Accretion surface (land gained) by the construction of the La Marina breakwater. Shows the change in the shoreline resulting from the construction of the submerged breakwater. This work, which was intended to defend the coastline from waves, induces beach accretion. Source: Own elaboration, 2018.

waves. The conclusion of the study conducted by Iribarren (1958) was that the Bocagrande channel was not closed by stranded and sunken ships but rather caused by the natural process of sedimentation that has created a coastal arrow. Because of the instability of this coastal arrow, the channel was reopened, allowing access to the bay again through Bocagrande Channel, which is why years later a submerged breakwater was built. This was the first precedent of coastal engineering, erosion control, and tourism development in the Cartagena de Indias coast.

Coastal Erosion

The environmental dialectic depends directly on the nature and initial morphology of the coastal zones and their borders. It is important to distinguish between structural and sedimentary coasts, the former being cliffs, reefs, and flats, whereas the latter category comprises beaches of different shapes, depending on the previous structural morphology.

The result of the environmental dialectic is, therefore, the dynamic equilibrium in which the losses and the recovery of the coast are performed in a cycle determined by the maritime climate and that can be daily, monthly, annual, even decadal. Many losses or increases of sediments in the coastal edge can be considered only as erosions or deposits, when they last beyond the climatic cycles manifested in those coasts. Coastal losses

that are not recovered within a decade are commonly defined as permanent losses and show a coastal imbalance.

Coastal erosion is a result of human activities and natural environmental changes, making the coastal dynamic action (wave, current, wind) lose balance in the coastal process. The long-term loss of sediments of coastal zone results in the destruction process of the coastline retreat and beach erosion (Yin-can *et al.*, 2017). The progression of the coastal erosion depends on two necessary conditions. First, the current flow needs to be strong enough to move bottom sediment, and second, the supply and disappearance of bottom sediments due to the flow are not in balance with each other. Thus, to prevent further erosion in determinate areas, the mechanism of the two conditions need to be analyzed (Mazda *et al.*, 2002).

Global Land Reclamation Situation

Previous studies performed by this research group showed that the lands that have been recovered from the sea in the world over the past two centuries have been concentrated in the Asian continent. In that continent, the use of ports has been relegated by the residents in terms of total area, and thus, the world's center of gravity is no longer Europe or the United States; on the contrary, it is moving to Asia. As an example, Japan has been one of the countries that most needed to expand to the sea because of its topography and the requirements of its

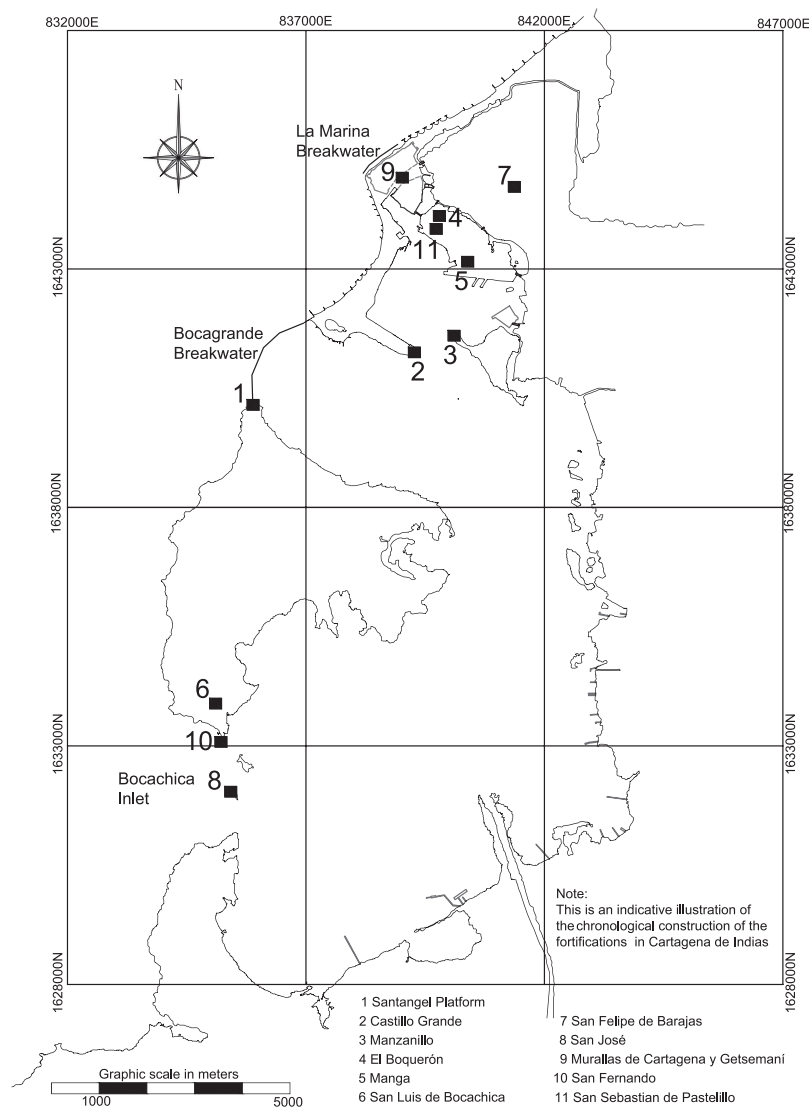


Figure 2. An indicative illustration of the chronological construction of the fortifications in Cartagena de Indias. This figure allows visualizing the defense constructions executed by the Spaniards, in a way that shows the change from original to constructed landscape. Source: El Puerto, a Place of Refuge. P. 130. Aguiló, 1999.

population, agriculture, urbanization, especially, industries, and port facilities.

Table 1 shows that most of the land reclaimed from the sea is in Asia, but not only in Dubai as people might think. The Japanese port expansion during the 20th century and the Chinese in the 21st century have brutally conquered the sea (Martín-Antón *et al.*, 2017).

Study Area

Cartagena de Indias is located on the Caribbean Sea, of NW Colombia (Figure 3). The bay is located above the thermal equator in both winter and summer equinoxes. In this zone the trade winds blow constantly from NE during December to April, whereas from May to November they weaken and register variations in both direction and speed. In the

transition period (May–July), they are mild except in July (the San Juan summer) during which they reach higher speeds.

The Caribbean region typically has an offshore wave climate, characterized by wave heights between 1 and 7 m and mean periods between 4 and 12 seconds. Nevertheless, in Cartagena de Indias specifically, representative offshore wave conditions have calm, moderate, and high wave conditions, with significant wave heights of 1, 2, and 3 m and with periods from 4 to 12 seconds (Otero *et al.*, 2016).

Geologically, the city of Cartagena de Indias and surrounding areas are predominantly located on Quaternary sediments, comprising coastal plain deposits and beach deposits. Additionally, in the city, outcrops of the La Popa Formation, which rests discordantly on the Pliocene Bayunca Formation, occur. The Bayunca Formation is thought to have originated in a zone

Table 1. Reclamation areas in the world. Source: Martín-Antón *et al.*, 2016.

No.	Landfill Reclamation	km ²	No.	Landfill Reclamation	km ²
1	San Francisco Bay	150	23	Qinzhou	36
2	Boston	27	24	Fangcheng	25
3	Rotterdam	36	25	Hong Kong	72
4	Bahrain	88	26	Zhuhai	102
5	Dammam	77	27	Taichung	53
6	Abu Dhabi	94	28	Mailiao	25
7	Doha	36	29	Yingkou	77
8	Dubai	68	30	Bayuquan	50
9	Mumbai	148	31	Changxing	55
10	Singapore	145	32	Dalian	66
11	Jinzhou-Huludao	81	33	Incheon	220
12	Tangshan, Caofeidian	275	34	Gunsan	43
13	Tianjin	365	35	Busan	45
14	Cangzhou	78	36	Gwangyang	76
15	Longkou	44	37	Kitakyushu	57
16	Huangdao	32	38	Fukuyama	30
17	Rudong	91	39	Kurashiki	30
18	Shanghai	400	40	Himeji	31
19	Ningbo	28	41	Osaka-Kobe	122
20	Zhoushan	57	42	Nagoya	67
21	Wenzhou	91	43	Toyohashi	27
22	Xiamen	72	44	Tokyo	250
Σ	Landfill reclamation world				4042

between the offshore and continental shelf. Its sedimentation characteristics also show sediments formed in an intertidal zone, affected by channels with abundant concentration of shells, and in other parts, abandoned channels fill with sandstones due to erosive contacts (Furrier, Vargas-Cuervo, and Moncada, 2017).

In general, beaches in the region of Cartagena de Indias present some similar morphodynamic characteristics. Beaches have a NE to SW orientation, with a bow- or parabolic-shaped formation and are classified as microtidal and exposed, with relatively shallow embayments (a/R_0 less than 0.3). Beaches are dissipative (>6 m) for moderate- and high-breaking waves and are intermediate ($2 << 5$ m) for low-breaking heights (0.3 to 0.9 m high). For all these waves heights, circulation of flow is normal ($d' > 20$). Sediments are fine to very fine sand grain sizes ranging from 0.18 to 0.21 mm, varying from south to north within the bays, (Moreno-Egel *et al.*, 2006).

Cartagena de Indias Bay is at the same divided into two bays: Internal Bay (Animas Bay), which develops within the imaginary line generated by Punta Castillo and Manzanillo Island, and External Bay, which is located at the interior of the Bocagrande inlet to the north, Bocachica inlet to the south, and separated from the open Caribbean Sea by Tierrabomba Island.

The external bay is shallow, mean, and has maximum depth of 16 to 26 m. With a surface area of approximately 82 km². The Bocagrande inlet is restricted by an underwater breakwater built during colonial times. Water depth in the Bocagrande inlet varies between 0.6 to 2.1 m, whereas Bocachica inlet reaches a maximum depth of 15.0 m (Figure 4). The tide in the internal Bay of Cartagena de Indias is mixed, but mainly diurnal, with a microtidal range that rarely exceeds 0.5 m (Restrepo *et al.*, 2017).

Between 1735 to 1741, Abanico Island was important for the bay's defense, located in Bocachica, and at the time had an extension of 42 ha. This island appears on maps with the same

shape until the end of the 19th century. It began to disappear from the maps in the last century, and today it is an island of only 3 ha of mangrove swamp that shows the problems of the island and the destruction of the mangroves between Bocachica and Caño de Loro (Andrade *et al.*, 2017; Figure 5).

Tierrabomba Island (Figure 6) has a littoral length of ~ 43 km and strong waves coming from the open sea, whose predominant direction is N and NE, affecting the N, NW, W, and SW areas of the island and with a significant wave height (H_s) between 1 to 7 m and mean period (T_m) between 4 to 14 seconds. When approaching the coast, it changes its direction with a parallel tendency to the coast due to the refraction effects and the shoaling effect; it loses 70% of its amplitude and between 87% to 90% when it reaches Tierrabomba and Punta Arena Islands, respectively, contributing to erosion and sediment transport (Castillo and Gamarra, 2014).

The largest beaches are mainly located in the Bocagrande area and conform a set of dissipative beaches controlled by breakwaters spaced approximately every 250 m. These Bocagrande beaches, totally anthropized and without dunes, are around 2.5 km length and between 30 to 70 m wide.

The area is mainly exposed to offshore waves coming from the NE as a consequence of the Alisios winds. The atmospheric-induced surges can exceed 0.2 m during strong storms (Andrade *et al.*, 2013).

After the building of the Dique channel, Cartagena de Indias Bay receives freshwater and sedimentation from the Magdalena River. The artificial channel was built during the Spanish colonial period.

Cartagena's coastline of the inner bay and Tierrabomba Island have vegetation corresponding to the humid tropical dry forest, with xerophytic and subxerophytic vegetation in scrubland and defined areas of mangrove. According to Mogollón (2012), the island's ecosystem is formed by coral reefs and extensive grasslands, whereas Castillo and Gamarra (2014), indicates that the grasslands ecosystem corresponds to mangrove (Figure 7) formed by the species of *Rhizophora Mangle* (red mangrove), *Avicennia Germinans* (black mangrove), *Leguncularia Racomosa* (white mangrove), and *Conocarpus Erectus* (mangrove shrub). From the previous paragraphs, it can be affirmed that the island of Tierra Bomba and the north of Baru Island are characterized by a coastline that is almost entirely mangrove defended (Andrade *et al.*, 2017).

Precisely, the defense to counteract the erosion of the inner part of the island has been performed by its vegetation. However, these ecosystems have been affected and have regressed, which could have been caused by the communities of Caño del Oro and Bocachica, due to pollution and logging. Similarly, Manzanillo Island has also seen its mangroves affected, mostly located to the south of the island, due to deforestation. Consequently, the dissipation of energy has been weakened allowing the erosion of its coastline (Gómez, Carvajal, and Olarte, 2011).

The greatest concentration of grasslands present in Cartagena de Indias are located at the southern half of the bay. With an approximate extension of 1.011 ha between 1935–45, its distribution reached 84% in the interior of the bay and 16% were dispersed along the coast towards the open sea (Diaz and Gómez, 2003).

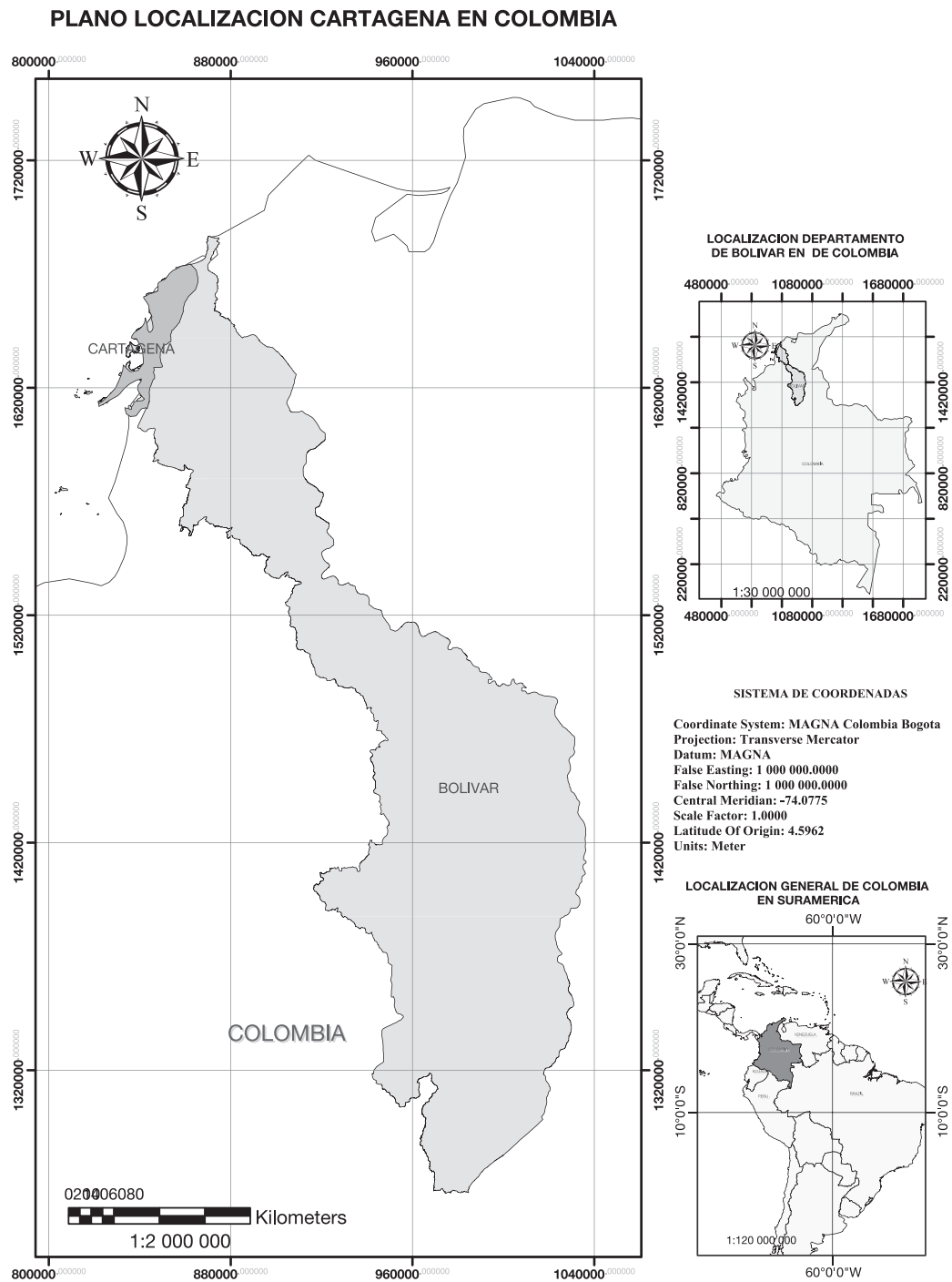


Figure 3. Georeferenced location (plane coordinates) of the city of Cartagena in the Department of Bolivar in the NW of Colombia. Colombia is located in South America at the bottom right (geographic coordinates). Elaborated with QGIS. Datum from Coordinate System MAGNA Colombia Bogotá, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

METHODS

Maps of different moments in history were vectorized with the purpose of determining changes in the coastline of the Cartagena de Indias Bays (internal and external). The oldest

one belongs to the General Archive of the Colombian Nation of the National Library. Its full title is Port plan of Cartagena de Indias and is registered in “fmapoteca_224_fagn_19.” According to the registry’s information, this plan was published as

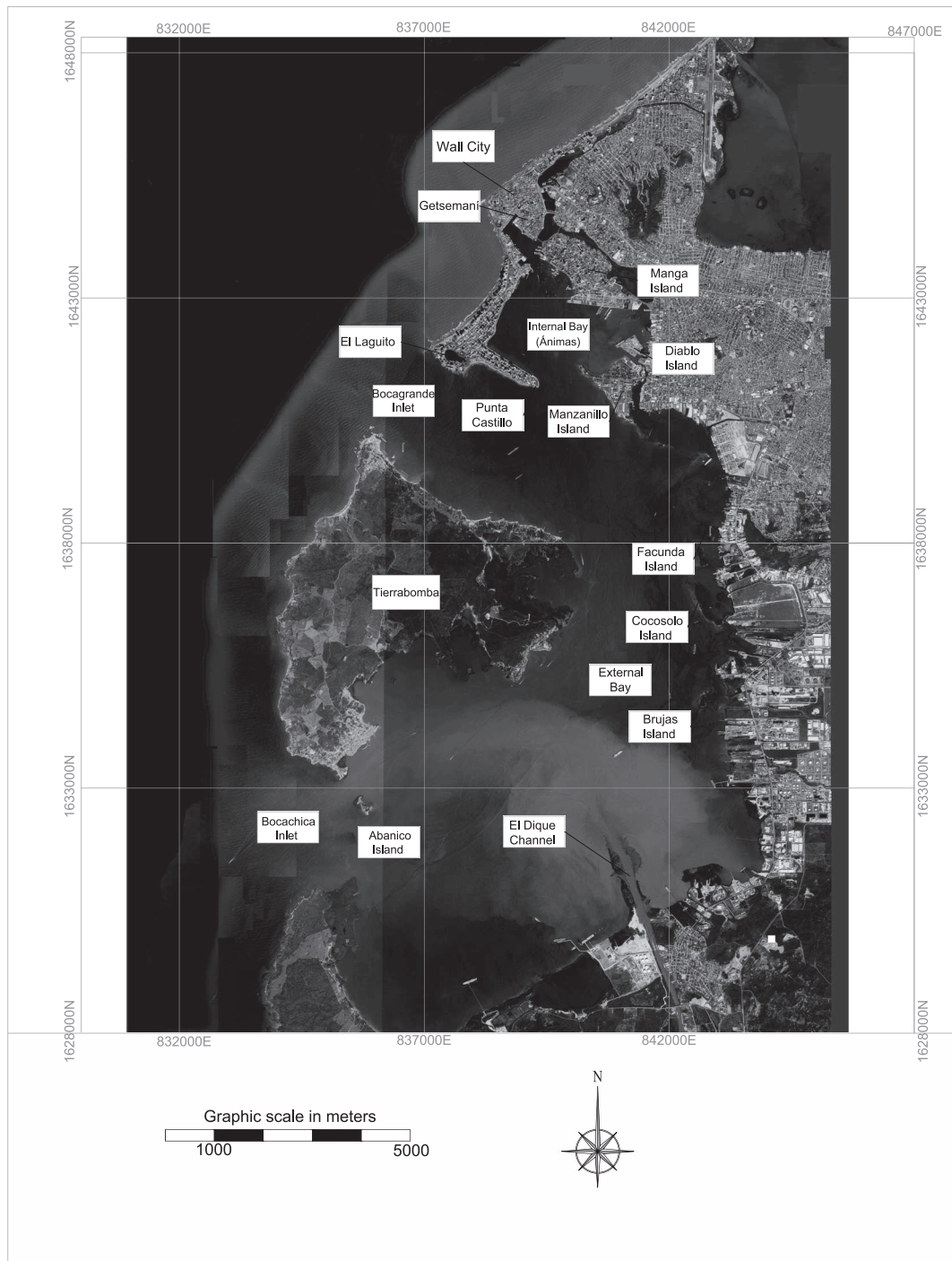


Figure 4. 2018 aerial photographs. Seventeen sites (framed) that correspond with the important places analyzed in this paper. This figure has 8672 × 4896-pixel size and 32-bit depth. Source: own elaboration, taken from Google Earth.

number plate 47 of the atlas entitled, “A Complete Historical, Chronological, and Geographical American Atlas, being a Guide to the History of North and South America, and the West Indies,” by H.C. Carey & I. Lea in Philadelphia in 1822.

The map in Figure 8, drawn by hand with pencil and ink, is oriented by a compass rose. It shows Cartagena’s Bays and main fortifications in detail. The numbers next to the compass rose’s radial lines indicate the bathymetry of the bay. Likewise,

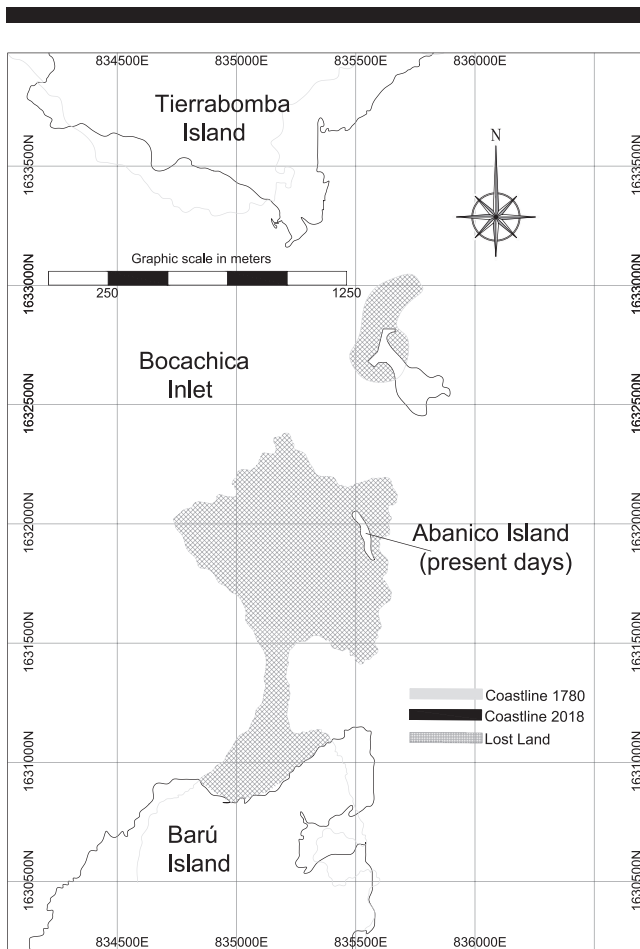


Figure 5. Erosion area through the almost disappearance of Abanico Island. Comparison of 1780 and 2018 vectorized plans. Evidences the loss of land of great importance in colonial times. Source: Google Earth aerial photographs, own elaboration.

a temporal comparison was made using as a modern reference, an image produced from aerial photographs obtained from Google Earth during 2018, which shows a more updated coastline (Figure 4). Figure 9 complements Figure 4 by introducing the current bathymetric data of the bay; Figure 9 was obtained by using a Chart Viewer tool, a platform conceived and managed by Navionics, Inc., and Navionics S.r.l. (Navionics, 2020).

The georeferencing of the historical map and current images was performed using the Free Software Geographic Information System QGIS (QGIS, 2021). This software allows access to the remote information through OGC Data servers of the Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), thus facilitating access to georeferenced cartography of the study area. The IGAC uses as Colombia's official reference system (datum) the MAGNA-SIRGAS (National Geocentric Reference Frame, a densification of the Geocentric Reference System for the Americas). The georeferencing has a projection by Transverse Mercator.

The accuracy and precision of the georeferencing is directly related to the characteristics of the control points, which meet the following conditions: unequivocally and clearly identifiable in the documents to be georeferenced, belonging to accurately represented elements, corresponding to elements considered invariable over time, and presenting a homogeneous and uniform distribution over the entire surface of the area to be studied (Álvarez and García, 2018).

Initially, the vectorization was also considered with the Free Software Geographic Information System QGIS version 3.4.8. However, the accuracy achieved was very low; therefore, the maps were finally vectorized using the computer-aided design software used for two-dimensional drawing, AutoCAD, in its 2013 version. The georeferenced plan was exported from QGIS to AutoCAD, converting the geographic coordinates into plane coordinates. The accuracy during the vectorization was done with the emphasis that the vectors were captured in the same scale as the real plan. The capture of the vector spatial object is a polygonal geometry type and was performed by using the possibility of adjusting the definition points of the vector entities to the raster (image) manually. During the adjustment, the zoom tool is used to mark the points more precisely. All figures contain graphic scales.

The vector precision based on digitized plans considers that the minimum detail present on a plan is $0.2 \text{ mm} \times E$, where E is the denominator of the plan scale. The constant 0.2 mm corresponds to the minimum separation discerned by the human eye on average, which means a real maximum error of 0.4 m .

A separate file database was created for each of the vectorized coastline. The data are homogeneous sets of common features in which each one has the same spatial representation (points, lines or polygons, and attributes).

Coastlines were compared by overlaying them on each other, and the land bodies of the historical cartographic plans had to be fractioned or rotated to fit them into the 2018 cartographic plans. Figure 10 and Table 2 show the separation or rotation necessary to fit the maps. Each of the vectorized coastlines was assigned specific attributes incorporated into the calculations; negative values correspond to erosion, whereas accretion corresponds to positive values.

Once the maps had been overlaid, the areas where major changes in the coastline had occurred were identified. For the identified areas, a third coastline was made, in an intermediate year, to observe in detail the coastline evolution. Subsequently, the coastline's variations were measured, which made it possible to calculate the area of change between coastlines. The estimated error was less than 5%, a value that correlates to the errors obtained in previous investigations of our research group.

RESULTS

The analysis of the changes in the Cartagena de Indias was performed in a clockwise direction, thus, the results has been shown from the sectors that have the largest population (north), and then, after a tour of the interior coastline of the external bay, to finally end up on Tierrabomba Island (west).

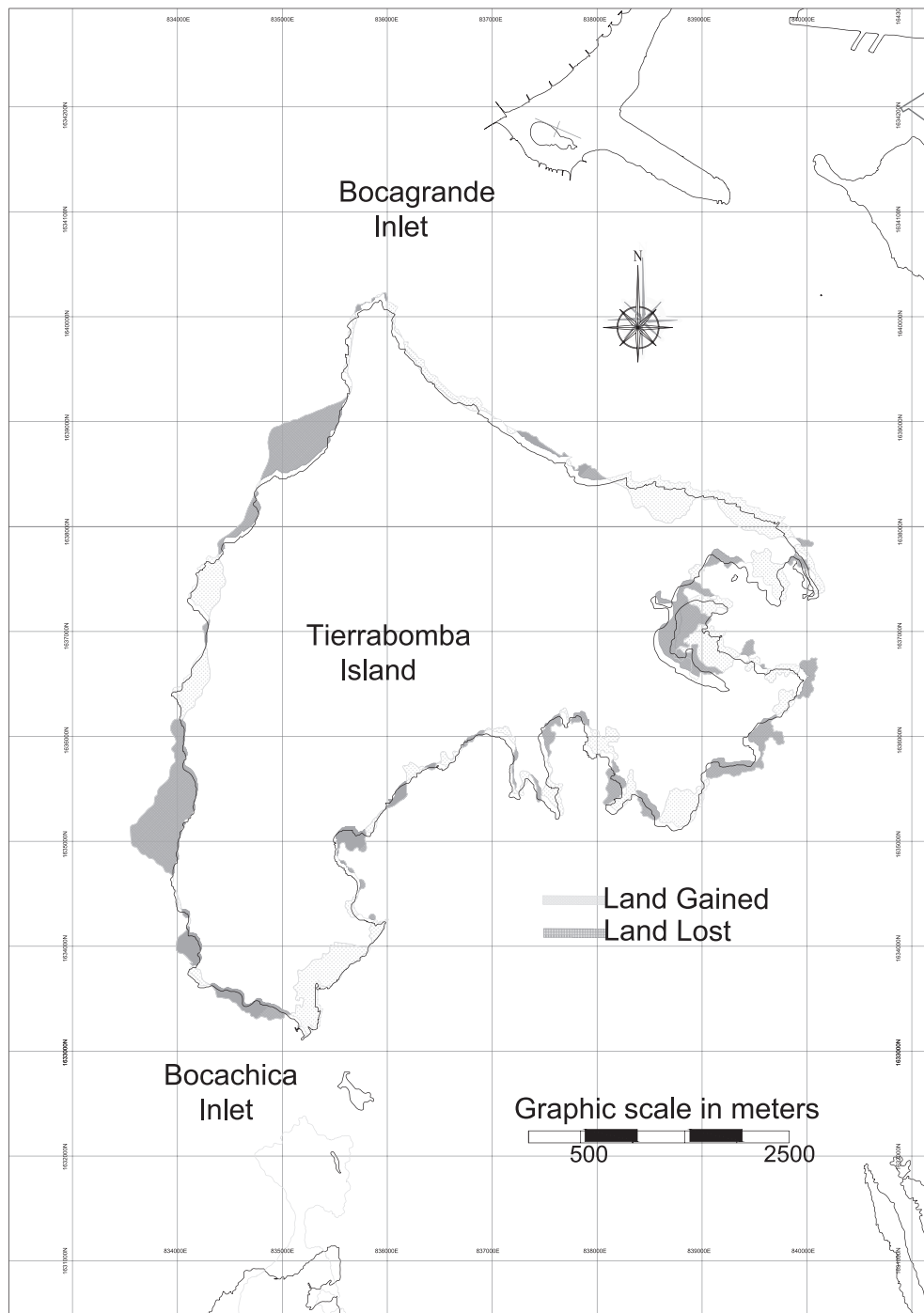


Figure 6. Erosion rate higher than accretion rate on Tierrabomba Island. Comparison of the 1780, 1954, and 2018 vectorized plans. Evidence of the loss of grasslands that were originally abundant in this area. Source: Google Earth aerial photographs, own elaboration.

Once the coastline superimposition of the vectorized cartographic plans of 1780 and 2018 was performed, the sectors where the greatest signs of accretion and erosion have occurred are shown in the Cartagena de Indias coastal landscape. As a complement, a comparison was made in the

sectors identified in an additional and intermediate time, completing three different times in history. Table 2 shows the separation or rotation necessary to fit the sectors in time, and the three years of comparison in the maps' superimposition.



Figure 7. Photography of mangrove in the Ciénaga de la Virgen, Cartagena de Indias. Mangrove present in the study area. Source: Personal Collection of Sofia Villegas Botero.

Table 3 shows the areas of land gained from the sea and those which, on the other hand, have been lost. Likewise, eight subzones were visualized that presented the greatest changes in the coastline. The works that generated accretion correspond to the construction of breakwaters such as La Marina and Bocagrande, the drying of the Caño San Anastasio to bring about La Matuna neighborhood, the construction of ports in Manga Island and Diablo Island, and the land filling in Manzanillo Island. Figures 1, 11, and 12 show the largest localized accretions.

Subzone a of Table 3 corresponds to La Marina Breakwater (Figure 1), also called the Santo Domingo breakwater, which was built by the engineer Antonio de Arévalo between 1762 to 1771 as a protection against storms that break the wall. The breakwater is made of stone and is developed parallel to the wall, from the Santo Domingo bulwark to the Santa Catalina bulwark. The submerged breakwater is joined to the wall by perpendicular branches, made with piles of stakes, which in turn reinforce the base of the wall with a stonework plinth of concave profile. This anthropogenic work made the waves break away from the wall, weakening the swell. The sand that reaches the wall and does not return to the open sea has been deposited between the breakwater and the wall, forming a

permanent beach called Playa Grande, which is located today in Santander Avenue. The accretion in this area amounts to 41,620 m². The erosion experienced in this sector was subsequently counteracted according to Iribarren's report.

Figure 13 shows subzone b of Table 3, where the current Barrio La Matuna is located, which is an area of accretion corresponding to the drying up of the San Anastasio channel that connected Bahía de las Ánimas with the El Cabrero lagoon. In Figure 11, the light gray area corresponds to the land gained by the drainage of the channel, which amounts to 69,318 m². The darker area represents the dried land of the channel, as shown in the 1735 Herrera y Sotomayor map in Figure 13.

Subzone c in Table 3 corresponds to the submerged Bocagrande Breakwater in Figure 12, whose construction by Antonio de Arévalo was completed in 1778. This anthropocentric work closed Bocagrande inlet, causing an accumulation of sedimentary material, which over time generated an arrow that finally closed forming the lagoon currently known as El Laguito. In addition to regenerating the Castillo Grande arrow. The result of this anthropogenic work, Cartagena de Indias gained 49,740 m² from the sea. The transport of sand that fed the beaches of Bocagrande was interrupted, generating erosion. Around the 1960s, new works were necessary to stabilize the beaches of El Laguito and Castillo Grande. These works were the construction of small breakwaters along the coastline and the construction of the large breakwater of the southwest beach of Bocagrande. Figure 14 shows the current over construction of this subzone.

Figure 4 shows the location of the islands in subzone d of Table 3, Manga and Diablo Islands. The islands have been modified by human action through the construction of modern ports, leading an accretion of 70,513 m². In fact, the Port of Cartagena and the SPRC Terminal are located on Manga Island. The accretion area generated by the construction of the ports was reinforced because of the works for the construction of the Los Cedros de Manga neighborhood. In 1992, the Port Company Compañía de Puertos Asociados S.A., "Compas," built the first private port in Colombia, divided into two docks located on the northern and western edges of Diablo Island.

Manzanillo Island, subzone c of Table 3 in Figure 4, has also presented a great change in its coastline. The accretion zones correspond to the north and west of the island. The accretion is due to anthropogenic constructions such as the filling to build the hotel La Casa de Huéspedes Ilustres, in the sector of Fort San Juan de Manzanillo and the filling of the beaches in the northeastern sector of the island in 2005. Meanwhile, in the area, landfills have been built for the Coast Guard facilities, the Oasis, and Fort San Juan de Manzanillo. In the southern zone, the erosive effect of indiscriminate deforestation of the mangroves was predominant, resulting in a rate of coastline retreat that was approximately double than the rate of accretion. After comparing the coastlines, Manzanillo Island has gained, between additions and subtractions, 25,500 m² from the sea. It is important to mention that the mangrove loss in this area corresponds to 17,500 m². Figure 15 is a digital infographic recreation of the coastal landscape of Manzanillo Island and Castillo Grande, in 1741, made for the Blas de Lezo Exhibition at the Naval Museum of Madrid in 2013; it corresponds to the definition of the constructed landscape.



Figure 8. Port map of Cartagena de Indias in 1780. Original and constructed landscape in the colonial times. The coastline shows the original vegetation. This figure has 11,686 × 7965-pixel size, 300-dpi resolution, and 24-bit depth. Source: General Archive of the Colombian Nation.

On the other hand, the erosion of beaches, meadows, and mangroves were due to the execution of uncontrolled logging (deforestation) and the massive destruction of coral reefs. This situation is evident in Facunda, Cocosolo, and Brujas Islands, which have lost their grasslands, whereas in the north of Barú, Abanico (almost eliminated) and Tierrabomba Islands have lost their mangroves and coral reefs. Figures 5, 6, and 16 are three clear examples of erosion in the bay.

Subarea f of Table 3 corresponds to Cocosolo, Facunda, and Brujas Islands (Figure 16). For these areas, the third coastline of 1854 corresponds to the nautical chart of the personal collection of Admiral (R) Rafael Grau Araujo. The superposition of the three coastlines showed undisputed erosion corresponding to grasslands and mangrove.

When analyzing the northern side of Barú Island, in Bocachica Inlet, Abanico Island was found (subzone f of Table 3 [Figure 5]). The island that appeared in plans until the end of the 19th century is today a small strip of mangrove, which shows evidence of great loss of this type of vegetation. The

overlaid coastlines resulted in erosion of more than 500,000 m². Figure 17 is another of the digital infographic recreations of the coastal landscape in 1741, made for the Blas de Lezo Exhibition in 2013, and corresponds to the Bocachica Inlet. In the figure, it can be seen in its total extension how the Abanico Island communicated with the Barú Island. This figure corresponds to the definition of the constructed landscape in terms of the San José bulwark, also showing Tierrabomba Island to the north of Bocachica Inlet.

Subzone h of Table 3, Tierrabomba Island (Figure 6), was analyzed. The greatest erosion of the coastline occurred on this island, mainly due to clearly defined anthropogenic factors such as uncontrolled deforestation and sediment transport affected by the opening of the Dique channel, which gradually destroyed the coral reef ecosystem and extensive seagrass meadows that protected the coastline. The area shows a loss of more than 520,000 m², mostly located on the east and west of the island. Figure 17 shows the original conformation of the island in 1741.

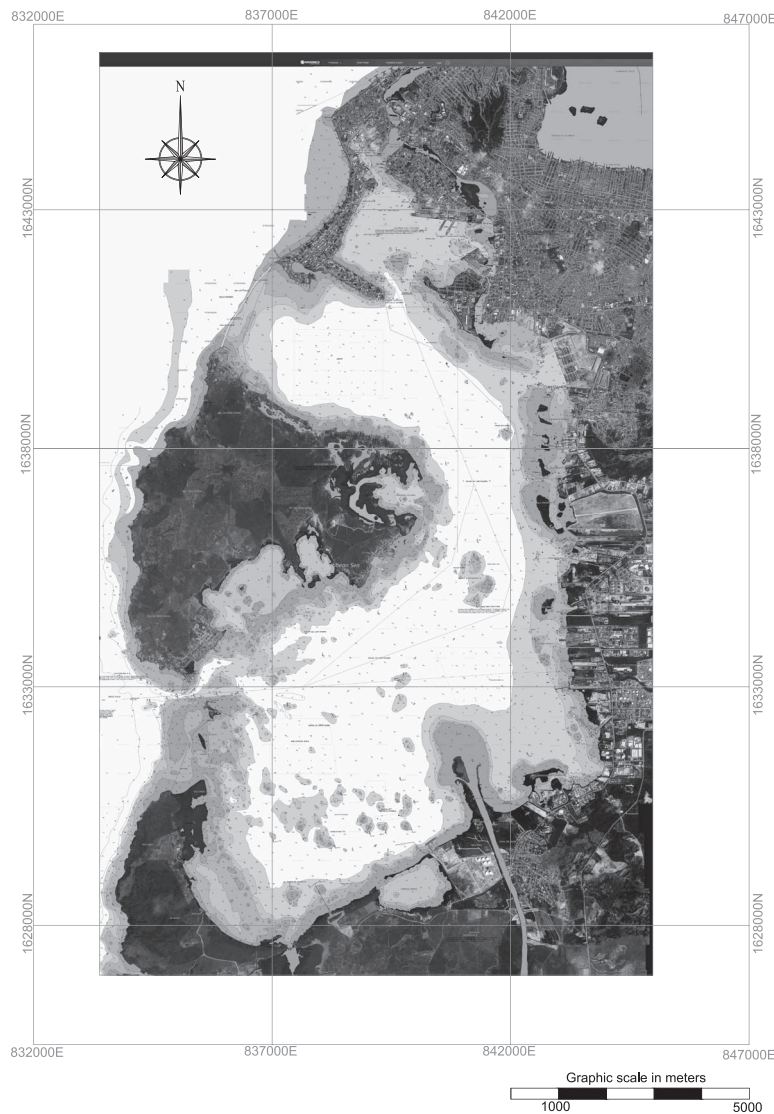


Figure 9. Bathymetric map of Cartagena de Indias 2018. Shows the shape of the bay bottom to visualize the respective changes, resulting from sediment transport due to shoreline changes. This figure has 4696×7832 -pixel size, 300-dpi resolution, and 32-bit depth. Source: Navionics, Inc., and Navionics S.r.l.

Figure 18 is an illustrated diagram of the vegetation present in the Cartagena de Indias Bays.

Finally, the area formed between the coast of each year of the study was measured, determining the area corresponding to the accretion with a positive sign, while those corresponding to erosion are shown with a negative sign. Table 3 shows the final balance of land gained and lost from the sea for each of the sectors analyzed. The coastal landscape evolution of Cartagena de Indias, which were quantified in areas of accretion and erosion from Spanish times to the present, is summarized in Table 3.

The results show that construction works are the generators of the accretion in coasts, whereas the negative actions of humans have deteriorated the coasts and caused the erosion in the coastal landscape.

DISCUSSION

The evolution of Cartagena de Indias coastline over the years, as a consequence of the littoral changes that produced the alteration of its landscape, can be attributed, as in many other cases, to direct human action, taking into account the geomorphological characteristics and coastal conditions of the Colombian Caribbean (Diaz, 2006).

The results of the superimposition of the coastlines in Table 3 show the areas where the accretion has occurred. It corresponds to the execution of anthropogenic work from the colony's construction, with the purpose of protecting the wall, "as is the case of the La Marina breakwater between 1762 and 1771," (Crespo, 2014) or by "the protection against possible invasions such as the Bocagrande breakwater in the period of 1771 to 1778" (Andrade *et al.*, 2004; Romero, 2000). Likewise,

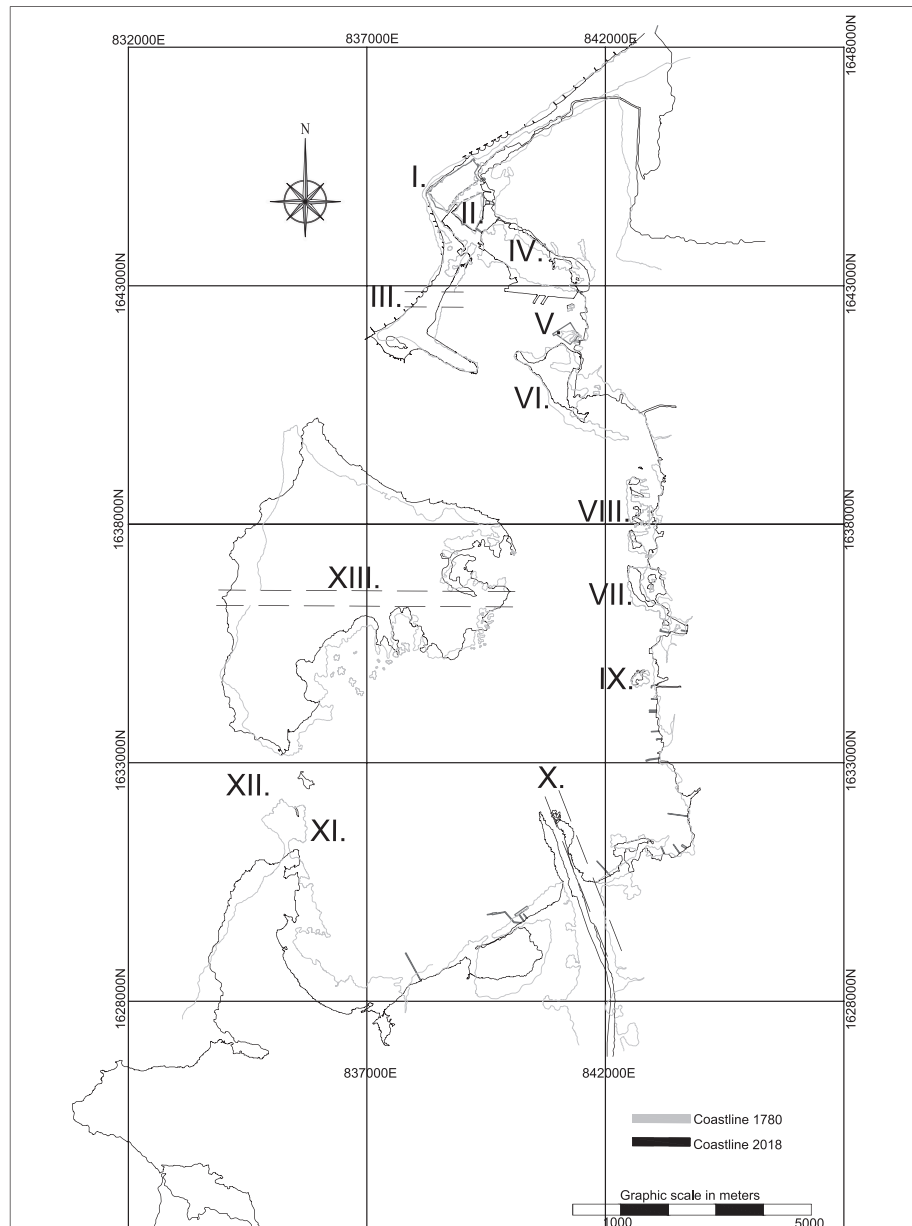


Figure 10. Separations and rotations for the superimposition of the cartographic plans in three different years, and identification of plots in the study area. The separations or rotations were numbered in Roman numerals and correspond to the measurements shown in Table 2, with the respective years of comparison. They indicate the adjustments required to fit the 1780 shoreline within the 2018 shoreline. Source: Own elaboration.

Bocagrande breakwater was the beginning of the progressive formation and regeneration of El Laguito and Castillo Grande. Due to sand movements, which are characteristics of La Boquilla and Bocagrande beaches, about 1961 reached the stability until what is known today (Vernette, Lesueur, and Vernet, 1984).

In addition to constructions of breakwaters, Cartagena found another way to retrieve lands from the sea, this time after drying out the San Anastasio inlet, which connected Las Ánimas Bay with El Cabrero lagoon, forming the area known

today as La Matuna (Figure 11). Modern ports also have generated retrieved areas by the manufacture of new compositions of existing islands, as Manga Island, where the Cartagena Port Company and the SPRC Terminal are located. In Diablo Island, the Sociedad Portuaria Compañía de Puertos Asociados S.A. built their private port, acting on the land use and port-city integration in reclamation areas in a lower scale, if it is compared with the land reclamation in Japan (Martín-Antón *et al.*, 2020).

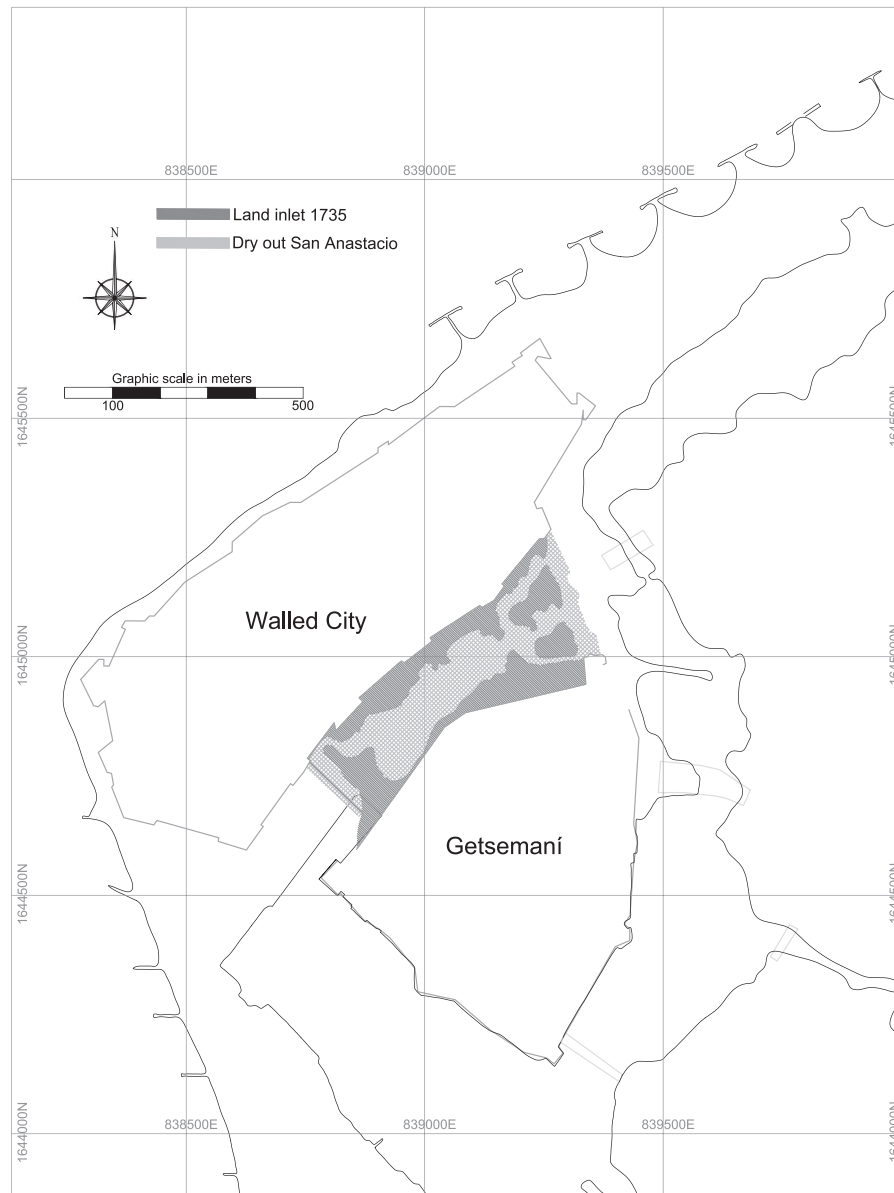


Figure 11. La Matuna neighborhood; accretion zone due to the drying up of the San Anastasio inlet. This neighborhood linked the walled city with Getsemani. The location is shown in Figure 8. Source: Own elaboration, 2018.

Human activities also occur, such as the deforestation of mangrove areas that lead to erosion and thus loss of land and reduction of the coast. This is the case of Manzanillo Island where 17,500 m² of mangroves have been lost. This loss of land has been compensated by the generation of beaches through the construction works such as the land fill created on the coast guard facilities Oasis and San Juan de Manzanillo. The study of the change in the coastline in Manzanillo Island by Gómez, Olarte, and Carvajal (2011) shows a result of 15,400 m² loss of mangroves, which is close in value (17,500 m²) to this research. It can also be concluded that the human action has changed the littoral morphology of the island, directly altering the hydro-

dynamics; furthermore, it can be said that the anthropogenic processes generated in the last 350 years far exceed those related to natural processes. Added to this are the natural hazards associated with rise of the sea level in the Colombian Caribbean (Robertson, Martínez, and Jaramillo, 2003).

Unfortunately, the bay's east side in front of Miraflores and Alboxnos (Figure 8) has not been so lucky, and the area where the Facunda, Cocosolo, and Brujas Islands are located (Figure 16) have suffered severe erosion, losing its grassland.

Regarding the erosion presented on the Abanico Island, the studies performed by Andrade *et al.* (2017) show 0.49 km² in contrast to 0.52 km² obtained by this research group,

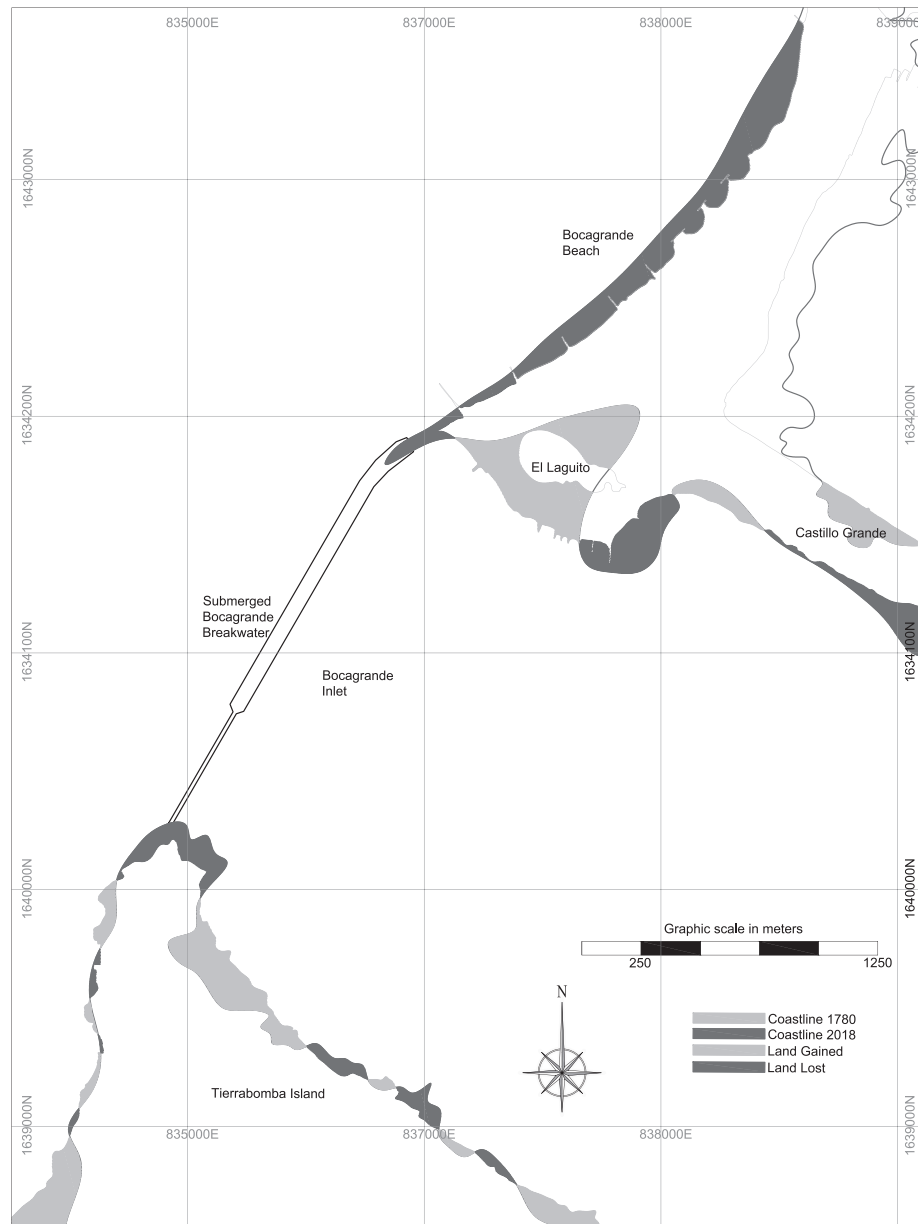


Figure 12. Bocagrande breakwater, shoreline comparison. Land gained and land lost. Shows the change in the shoreline resulting from the construction of the submerged Bocagrande breakwater. This work of defense against possible attacks by Franco-English pirates, originates great changes in the coastline. Source: Own elaboration, 2018.

corresponding to the 93% loss of the island comprising mainly mangroves.

Tierrabomba Island (Figure 6) had a higher rate of erosion than of accretion. Note that the island was initially protected by an ecosystem formed by coral reefs and extensive grasslands, and since the opening of the Dique Channel (Mogollón, 2012), this ecosystem suffered an inversely exponential reduction (Díaz and Gómez, 2003), leaving the internal coast of the island fragile and exposed to erosion. The mangrove ecosystem, formed by the species of red, black, and white mangrove and

mangrove shrub, has maintained its defense against the erosion of the internal part of the island; the importance of these mangroves lies primarily in their capacity to trap and stabilize sediments, their high biological productivity, their important role in recycling nutrients, and providing food and protection to a wide variety of fauna during all or part of their life cycles (Phillips and Meñez, 1988).

The comparative analysis of the southern coastline of Cartagena's Bay has shown the loss of entire islands and large sectors of coastal mangroves, as indicated by Andrade *et al.*

Table 2. Separation or rotation and years of comparison in the maps' superimposition. Source: Own compilation, 2018.

No.	Body of Land	Separation or Rotation	Comparison Year		
I.	La Marina breakwater	10°	1762	1950	2018
II.	La Matuna neighborhood	8°	1735	1950	2018
III.	Bocagrande	318 m	1730	1928	2018
IV.	Manga Island	-	1780	-	2018
V.	Diablo Island	-	1780	1937	2018
VI.	Manzanillo Island	14°	1780	1935	2018
VII.	Cocosolo Island	6°	1780	1854	2018
VIII.	Facunda Island	-	1780	1854	2018
IX.	Brujas Island	-	1780	1854	2018
X.	Canal del Dique	318 m	1780	-	2018
XI.	Abanico Island	-	1780	1854	2018
XII.	Bocachica	-	1780	-	2018
XIII.	Tierrabomba Island	321 m	1780	1954	2018

Table 3. Balance of land gained from and lost from the sea. Source: Own compilation, 2018.

No.	Work Location	Balance [km ²]		
a.	La Marina breakwater	0.04	0.26	Accretion [km ²]
b.	La Matuna	0.07		
c.	Bocagrande breakwater	0.05		
d.	Manga - Diablo Islands/ports	0.07		
e.	Manzanillo Island	0.03		
f.	Cocosolo, Facunda, and Brujas Islands	-0.45	-1.48	Erosion [km ²]
g.	Abanico Island	-0.51		
h.	Tierrabomba Island	-0.52		
Total		-1.22		

(2017) and Díaz (2004), which is a situation that exposes Cartagena's coast and lowlands to a systematic, gradual, and constant flooding, much more accelerated than the world's average, which is the result of two known phenomena: the rise of the sea level due to global warming and the sinking of the land (INVEMAR, 2017) and/or subduction caused by excessive construction on the coastal edge.

CONCLUSIONS

The term landscape corresponds to humanity's perception of nature that surrounds it; thus, if the intention is to refer to this environment before human intervention, it must be called an

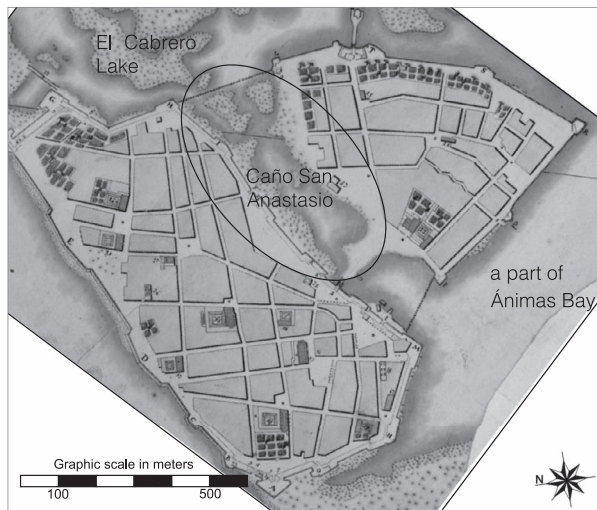


Figure 13. Comparative maps of the neighborhood of La Matuna in Cartagena de Indias, Colombia, 1735 and 2018. Allows easy visualization and location of the caño drying area. Source: Juan de Herrera y Sotomayor and aerial photographs from Google Earth.



Figure 14. Modern photograph of Cartagena de Indias. Destroyed landscape. Evidence of over construction on the Bocagrande shoreline. Source: Pedraza Producciones, 2018.



Figure 15. Digital infographic recreation of the coastal landscape of Manzanillo Island and Castillo Grande, in 1741. It allows to perceive the original vegetation and the shape of the coastline in colonial times. It corresponds to the definition of the Built Landscape. Source: Blas de Lezo exhibition at the Naval Museum of Madrid in 2013.

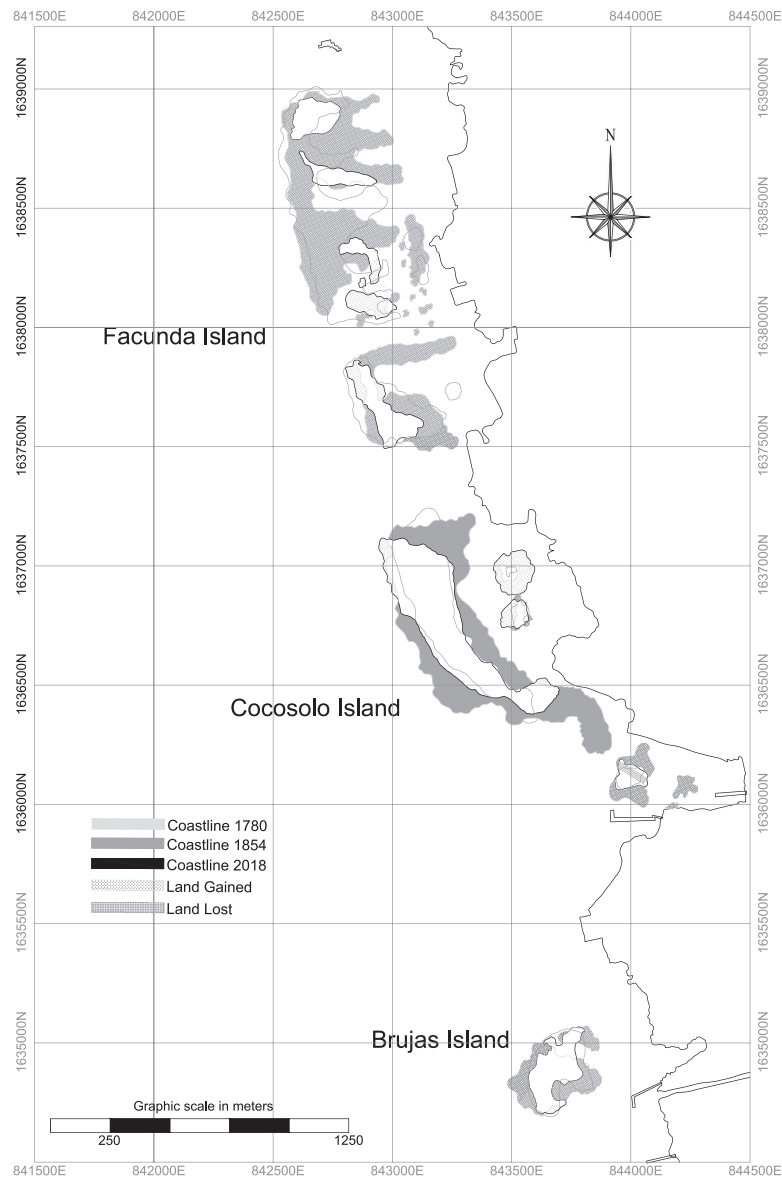


Figure 16. Grasslands erosion in Facunda, Cocosolo, and Brujas Islands. Comparison of 1780, 1854, and 2018 vectorized plans. Shows the loss of land resulting from uncontrolled deforestation and other human actions. Source: Google Earth aerial photos, own compilation.

original landscape. Within this concept, a natural coast does not exist; an original coast exists.

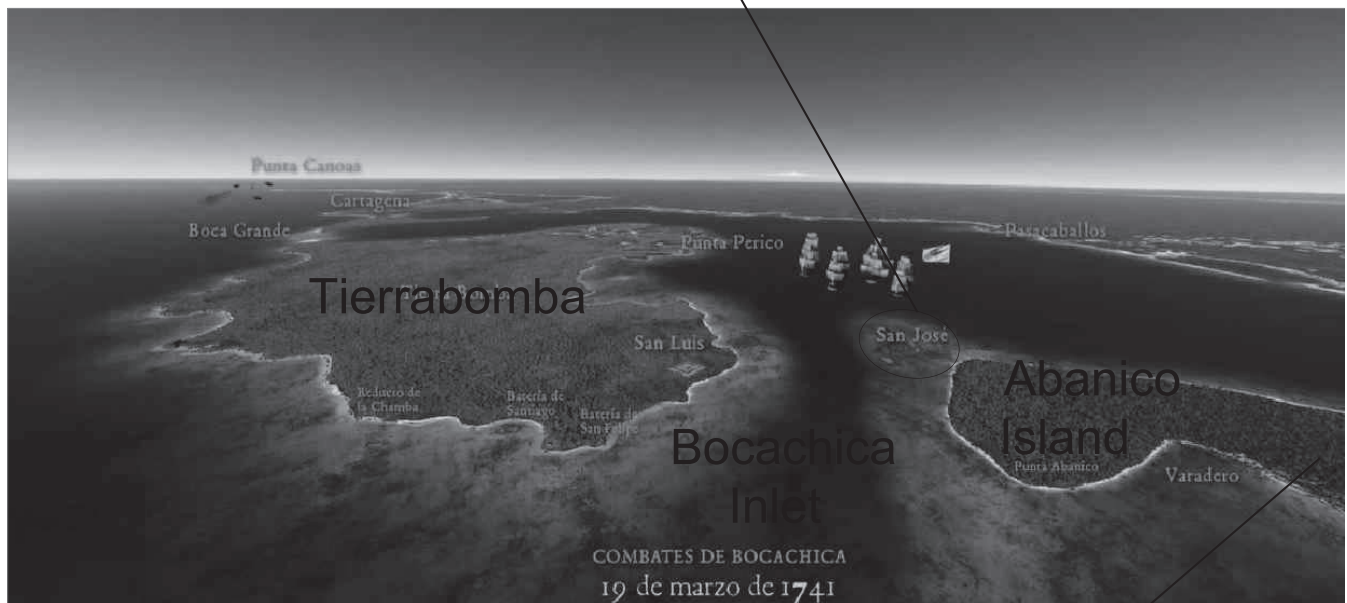
Cartagena de Indias clearly responds to the landscape concepts defined in this research. The original landscape corresponds to the landscape existing in the bay before the arrival of the Spaniards in America. The constructed landscape was developed during the Colonial period. The destroyed landscape is the response to the over construction of the coasts, which occurs simultaneously with inadequate land use and management that causes deterioration and erosion.

Therefore, the stages of the art of construction are also evident in Cartagena de Indias: submission, adaptation, and

conquest, in correlation with the landscape concepts described in the previous paragraphs.

It is difficult to find coastal environments in which human interaction has maintained the original landscape of the coast, and Cartagena de Indias is no exception. Therefore, the original landscape has been changing over time. The transformation began in colonial times with the construction of defense structures and after centuries of conquest of the territory; areas such as El Laguito, Bocagrande, and the historic center of Cartagena de Indias became a destroyed landscape due to the overconstruction of its coasts (Figure 14).

The changes of Cartagena's coastline and the study of the wave effects and coastal drift in the region have been



Barú Island
(start)

Figure 17. Digital infographic recreation of the coastal landscape of Bocagrande Inlet, Abanico and Tierrabomba Islands, in 1741. It allows to perceive the original vegetation and the shape of the coastline in colonial times. It corresponds to the definition of the Original and Built Landscape. Source: Blas de Lezo Exhibition at the Naval Museum of Madrid in 2013.

documented on certain cases and in specific periods by different engineers and researchers in this field. This paper compared

the inner and outer bays, dividing the analysis by sectors where the changes in the coastline were most evident.

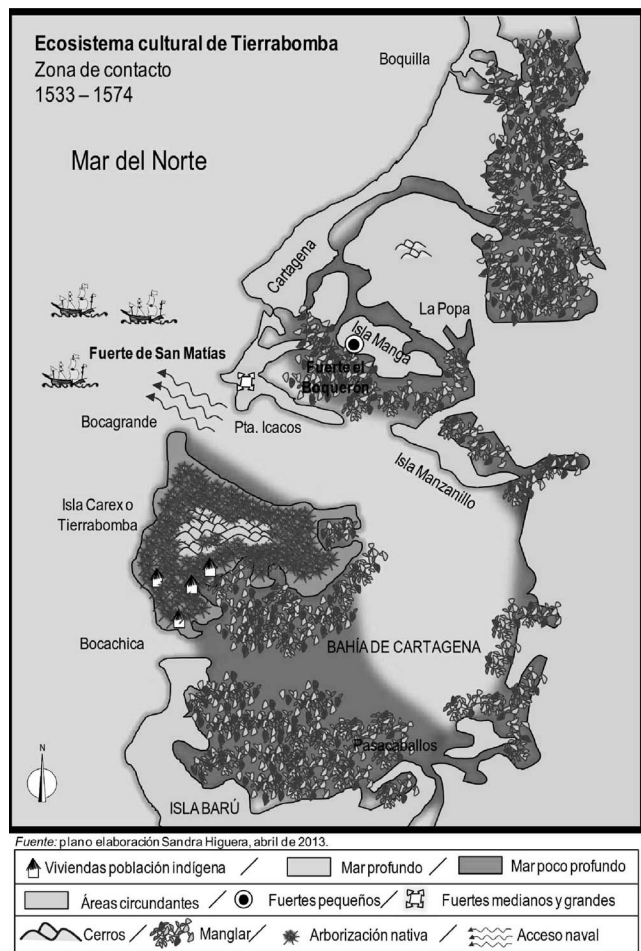


Figure 18. Illustration of the location of vegetation in the Bay of Cartagena de Indias, which allows a graphic visualization of the distribution of grasslands and native trees in the bay. Source: Final project for the Master's degree in Coastal Cultural Ecosystem in Bocachica (Tierrabomba Island–Cartagena) by Sandra Higuera Gómez, 2013.

The natural evolution of the city was due to its orientation toward the sea. It maintained its monumental nature and the uncontrolled growth of mass construction. Cartagena de Indias coastal line presents a negative balance of 1.22 km², whose main origin is the indiscriminate logging of mangroves and grasslands, which is not compensated by artificial fillings or the construction of ports.

The evaluated cases have shown an erosive tendency of Cartagena de Indias coastline, as well as other Colombian Caribbean coast (Molina, Molina, and Chevillot, 1992), such as Santa Marta according to the analysis of Díaz (2009). The erosion is located especially in the southern part of the bay, generating the need of prompt measures in this area to determine the actions to be implemented to restore the coral reefs, mangroves, and grasslands in such a way as to reach a positive balance that will change the trend shown by this and research from others.

The current concern for sustainability and respect for the environment is the turning point for the last phase of landscape. It is expected that Cartagena de Indias manages to adapt and evolve toward the reconstructed landscape.

ACKNOWLEDGMENTS

This research is in honor and tribute to Professor Javier Diez, who passed away 5 April 2019. He collaborated on this paper during the last months of his life. The authors honor his time, wisdom, and dedication; he shared his knowledge and passion with us, which were required for a correct study of the coast, its dynamics, and the interaction we have as a species with this energetic environment.

LITERATURE CITED

- Aguiló, M., 1999. *El Paisaje Construido, Una Aproximación a la idea de Lugar*. España: Castalia S.A., 301p.
- Aguiló, M., 2013. *Qué significa Construir. Claves Conceptuales de la Ingeniería Civil*. Madrid, España: Abada Editores, S.L., 200p.
- Álvarez, R. and García, C., 2018. Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España), *GeoFocus*, 21, 101–118.
- Andrade, C.; Ferrero, A.; León, H.; Mora, H., and Carvajal, H., 2017. On coastline changes between 1735 and 2011 and subsidence in Cartagena Bay, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 94–106.
- Andrade, C.; Thomas, Y.; Login, S.; Parra, C.; Kunesch, S.; Menanteau, L., and Velasco, S., 2004. Aspectos morfodinámicos de la bahía de Cartagena de Indias. *Boletín Científico No. 22 - CIOH*, 90–104.
- Andrade, C.A.; Thomas, Y.F.; Lerma, A.N.; Durand, P., and Anselme, B., 2013. Coastal flooding hazard related to swell events in Cartagena de Indias, Colombia. *Journal of Coastal Research*, 29(5), 1126–1136.
- Bateman, A.D., 1970. *Apuntes para la Historia de la Ingeniería en Colombia (Vol. 1)*. Bogotá D.C., Colombia: Editorial Kelly, 249p.
- Bateson, F.W. (ed.), 1961. *The Poems of Alexander Pope, Epistles to Several Persons Moral Essays. The Twickenham Edition; Volume 3, Part 2*. London: Methuen, 190p.
- Castillo, M.A. and Gamarra, E.A., 2014. Análisis multitemporal de la línea de costa en la isla de Tierrabomba y proyección del mapa de inundación por aumento del nivel medio del mar. *Boletín Científico No. 32 - CIOH*, 163–177.
- Corominas, J., 1983. *Breve diccionario etimológico de la lengua castellana (Tercera ed.)*. Madrid, España: Editorial Gredos S.A., 628p.
- Crespo, J.A., 2014. Presentación digital del Escenario de la Conciencia. Cartografía y Evolución de la Defensa de Cartagena de Indias. <http://www.elespiadigital.com/images/stories/Documentos3/CEU.pdf>
- Del Campo y Frances, A., 1951. Paisaje y Paisajismo. *Revista de Obras Públicas*, 99(1), 261–274.
- Díaz, G., 2004. Evolución estacional de la línea de costa. El caso de Cartagena de Indias. *Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX No. 134*, 47–54.
- Díaz, G., 2006. La costa caribe colombiana. Consideraciones base para el estudio de sus afectaciones. *Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX No. 143*, 133–140.
- Díaz, G., 2009. Evolución histórica de la línea de costa en la región caribe de Santa Marta, Colombia. *Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX No. 155*, 111–120.
- Díaz, J.M. and Gómez, D.I., 2003. Cambios históricos en la distribución y abundancia de praderas de Pastos Marinos en la Bahía de Cartagena y áreas aledañas (Colombia). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras No. 32*, 57–74.
- Fernández, F., 2014. El nacimiento del concepto de paisaje y su contraste en dos ámbitos culturales: el viejo y el nuevo mundo.

- Perspectivas sobre el paisaje. *Universidad Nacional de Colombia/ Jardín Botánico José Celestino Mutis*, 55–79.
- Furrier, M.; Vargas-Cuervo, G., and Moncada, C., 2017. Geomorphological characterization and mapping of Cartagena de Indias and adjacencies. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 41, 5–14.
- Gómez, W. and Carvajal, A.F., 2011. Estrategia para la defensa y ubicación de las fortificaciones de la plaza fuerte de Cartagena de Indias en el Siglo XVIII a partir de condiciones Océano-Atmósfera y variaciones morfológicas en la línea de costa. *Saber, Ciencia y Libertad*, 179–192.
- Gómez, W.; Olarte, J.C., and Carvajal, A.F., 2011. Análisis Multi-temporal (1937–2010) de la línea de costa de la Isla de Manzanillo, Bahía de Cartagena-Colombia. *Derrotero—Revista de la Ciencia y la Investigación*, 139–151.
- Hernández, S. and Hernández, S., 2013. Actuaciones en los Ríos: Mejoras Ambientales y Paisajísticas. *Segundo Congreso Internacional de Ingeniería Civil y Territorio. (Galicia, Norte de Portugal)*, 59–82.
- Higuera Gómez, S. 2013. El ecosistema cultural de litoral en Bocachica (Isla de Tierrabomba—Cartagena): Lineamientos básicos para la formulación de un Plan Especial de Salvaguardia (PES). Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana, Master's thesis, 184p.
- INVEMAR, 2017. *Análisis de Vulnerabilidad Marino-Costera e Insular ante el Cambio Climático para Colombia*. Santa Marta, Colombia: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés, 256p.
- Iribarren, R., 1958. *Informe Sobre la Defensa de las Costas y las Playas de Cartagena (Colombia)*. Madrid, España: Centro de Estudios de Puertos y Costas, CEDEX, 125p.
- Lemaitre, E., 1983a. *Historia del Canal del Dique (Volume 1)*. Bogotá D.C., Colombia: Colegio de Ingenieros, 234p.
- Lemaitre, E., 1983b. *Historia General de Cartagena Tomo III*. Bogotá D.C., Colombia: Banco de la República, 248p.
- Martín, M., 2018. Obras públicas, evolución y paisaje costero. De la Situación en España al Gigantismo Asiático. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. PhD dissertation, 156p.
- Martín-Antón, M.; del Campo, J.M.; Negro, V.; Luengo Frades, J.; Moreno Blasco, L.J., and Jiménez Verdejo, J.R., 2020. Land use and port-city integration in reclamation areas: A comparison between Spain and Japan. In: Malvárez, G. and Navas, F. (eds.), *Global Coastal Issues of 2020. Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 95, pp. 278–282.
- Martín-Antón, M.; Negro, V.; del Campo, J.M.; López, J.S., and Esteban, M.D., 2016. Review of coastal Land Reclamation situation in the World. *Journal of Coastal Research*, 75(10075), 667–671.
- Martín-Antón, M.; Negro, V.; del Campo, J.M.; López, J.S., and Esteban, M.D., 2017. The gigantism of public works in China in the twenty-first century. *Sustainability*, 9(9), 1–14.
- Mazda, Y.; Magi, M.; Nanao, H.; Kogo, M.; Miyagi, T.; Kanazawa, N., and Kobashi, D., 2002. Coastal erosion due to long-term human impact on mangrove forests. *Wetlands Ecology and Management*, 10, 1–9.
- Mogollón, J.V., 2012. El Dique en el Siglo XIX: Del Canal de Totten al Ferrocarril Cartagena-Calamar. *Publicaciones Uitecnológica No. 26*, 171–196.
- Molina, A.; Molina, C.; and Chevillot, P., 1992. La percepción remota aplicada para determinar la circulación de las aguas superficiales del Golfo de Urabá y las variaciones de su línea de Costa. *Boletín Científico No. 11 - CIOH, Colombia*, 43–58.
- Moreno-Egel, D.; Agamez, M.; Castro, E., and Voulgaris, G., 2006. Beach morphology and coastal protection along headland bays in Cartagena, Colombia. In: Klein, A.H.F.; Santana, G.G.; Rorig, L.R.; Finkl, C.W.; Diehl, F.L., and Calliari, L.J. (eds.), *Proceedings from the International Coastal Symposium (ICS) 2004. Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 39, pp 1658–1664.
- Navionics, 2020. <https://www.navionics.com/>
- Negro, V.; Martín, M., and del Campo, J.M., 2018. *Huellas del Tiempo. Territorio y Paisaje (Vol. 1)*. España: Negro Valdecantos, Vicente, 136p.
- Olmo, R., 2014. El Convenio Europeo del Paisaje del Consejo de Europa. Notas sobre su aplicación en España. *Patrimonio Cultural y Derecho*, 18, 175–206.
- Otero, L.J.; Ortiz-Royero, J.C.; Ruiz-Merchan, J.K.; Higgins, A.E., and Henriquez, S.A., 2016. Storms or cold fronts: What is really responsible for the extreme waves regime in the Colombian Caribbean coastal region. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 391–401.
- Peña, J.M., 2007. *Guía Técnica de Estudios Litorales*. España: Artes Gráficas Palermo, S.L., 656p.
- Phillips, R.C. and Meñez, E.G., 1988. *Seagrasses, Volume 14*. London: Smiths, 104p.
- QGIS (Software Geographic Information System), 2021. <https://qgis.org/en/site/>
- Restrepo, J.C.; Escobar, J.; Otero, L.; Franco, D.; Pierini, J., and Correa, I., 2017. Factors influencing the distribution and characteristics of surface sediment in the Bay of Cartagena, Colombia. *Journal of Coastal Research*, 33(1), 135–148.
- Robertson, K.; Martínez, N.J., and Jaramillo, O., 2003. Amenazas naturales asociadas al ascenso del nivel del mar en el Caribe Colombiano. *Cuadernos de geografía. Departamento de Geografía - Universidad Nacional de Colombia*, XII(1–2), 135–153.
- Romero, D., 2000. *Iribarren, Ingeniería y Mar*. Madrid, España: Centro de Estudio y Experimentación de Obra Públicas—CEDEX, 285p.
- Segovia, R., 2001. Atlas histórico de Cartagena de Indias: Paso a paso, la construcción civil, militar y religiosa de la ciudad. *Credencial Historia No. 143*, 120p.
- Segovia, R., 2009. *Las fortificaciones de Cartagena de Indias: Estrategia e historia*. Bogotá: Carlos Valencia Editores, 83p.
- Vernette, G.; Lesueur, P., and Klingebiel, A., 1984. Evolución morfológica y sedimentológica de la flecha litoral del Laguito, (Bahía de Cartagena - Colombia). *Boletín Científico No.5 - CIOH*, 3–23.
- Yin-can, YE., 2017. *Marine Geo-Hazards in China*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, pp. 269–296.

Artículo n°2
Comparing the Effects of Erosion and Accretion
along the Eastern Coast of Río de Janeiro and
Guanabara Bay in Brazil

Article

Comparing the Effects of Erosion and Accretion along the Eastern Coast of Río de Janeiro and Guanabara Bay in Brazil

Silvia V. González Rodríguez ^{1,*} , Vicente Negro Valdecantos ¹ , José María del Campo ¹ 
and Vanessa Torrodero Numpaque ² 

¹ Marine, Coastal and Port Environment and Other Sensitive Areas Research Group, Department of Civil Engineering: Hydraulics, Energy and Environment, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, Spain; vicente.negro@upm.es (V.N.V.); josemaria.delcampo@upm.es (J.M.d.C.)

² Construction Department, School of Agronomic, Food and Biosystems Engineering, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, Spain; vanessa.tnumpaque@alumnos.upm.es

* Correspondence: silviaviviana.gonzalez.rodriguez@alumnos.upm.es

Abstract: This paper presents a case study of a general research project investigating the coastal landscapes' evolution in different port cities of the American continent with a common historical background: colonization. The general aim is to ascertain whether the evolution of coastal landscapes in the selected port cities is influenced by the origins of their colonizers, who initiated changes that shaped these cities into repositories of artistic, cultural, and historical heritage. The paper presents a study of the coastal landscape transformation in Rio de Janeiro and Guanabara Bay, Brazil. The study employs a comparative approach, utilizing cartographic maps from disparate historical periods, with the objective of identifying and quantifying changes in the coastline. The results indicate that accretion exceeded erosion over the study period. The erosion is associated with the loss of mangroves, underscoring the necessity for environmental protection and reconstruction efforts in affected regions. The research contributes to the existing body of knowledge by providing a comprehensive analysis of the coastal transformation in Rio de Janeiro and Guanabara Bay and its impact on the environment. Furthermore, it allows for a comparison with the port cities of the other case studies in the overall research.



Citation: González Rodríguez, S.V.; Negro Valdecantos, V.; del Campo, J.M.; Torrodero Numpaque, V. Comparing the Effects of Erosion and Accretion along the Eastern Coast of Río de Janeiro and Guanabara Bay in Brazil. *Sustainability* **2024**, *16*, 5728. <https://doi.org/10.3390/su16135728>

Academic Editor: Giorgio Anfuso

Received: 23 May 2024

Revised: 1 July 2024

Accepted: 1 July 2024

Published: 4 July 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Keywords: Rio de Janeiro; Guanabara Bay; littoral; coastline; colonial cartography; aerial photography; accretion; erosion

1. Introduction

The coastline is the boundary between the land and the ocean or sea. Its nature depends on the coastal geomorphology, climate, vegetation protection, and human activities, which together influence soil stability and its ability to decompose and become particles transported along the coast [1]. The transportation of material involves the movement of particles from their original location to a deposition site, resulting in the accumulation of material at the receiving beach and the erosion of material at the original site. Erosion and accretion are natural processes that occur on shorelines over various time scales. These changes are influenced by a number of factors, including short-term events such as storms, waves, tides, and winds, as well as long-term events such as glaciation, sea level changes, and tectonic activities that can cause coastal subsidence or emergence [2].

Coastlines are naturally dynamic entities engaged in a continuous interaction between the ocean and the continent. The ocean exerts a profound influence on the continent, modifying its morphology through processes of erosion or accretion. The receding water transports material back to the coastline, perpetuating this cycle. This dynamic interaction depends on the initial nature and morphology of the coastal zones. It is important to distinguish between structural coasts (cliffs, reefs, flats) and sedimentary coasts (various beach shapes influenced by structural morphology) [3]. The environmental dialectic results

in a dynamic equilibrium where coastal erosion and recovery occur in cycles influenced by the maritime climate, ranging from daily to decadal. In order for sediment changes to be considered erosion or deposition, they must persist beyond the aforementioned cycles. Any coastal losses that are not recovered within a decade are considered to be permanent and indicative of a coastal imbalance.

The aim of this research is to examine the coastal region of the east part of Rio de Janeiro and Guanabara Bay in Brazil, which has historical significance as a site where the transformation of the landscape from its original state to a constructed one can be observed. This transformation was the result of direct human action, and after excessive human intervention, the landscape in some areas was severely damaged, demonstrating the necessity for its reconstruction. The degree of landscape transformation was quantified in areas where the most significant anthropogenic impact was observed, with the results classified as either erosion or accretion. In addition to the aforementioned considerations, other aspects related to landscape transformation were also evaluated, including the potential implications of land use and various practices on the landscape and future developments. This paper presents a case study of a general research project investigating the evolution of coastal landscapes in various city ports across the American continent. The general research examines the impact of anthropogenic actions, including land use changes, environmental policies, customs, and other factors, on the coastal landscape from the colonial era to the present.

As has already been studied by this research group, there are four phases in the perception of the physical environment to understand and to shape the ecosystem and turn it into a territory, to transform it from a “site” into a “place”; these being submission, adaptation, conquest, and respect. The following definitions will be used by González et al. [3].

Submission phase: Humans fear nature, and cities are built away from the sea’s shoreline to be protected from storms and rough weather whilst also watching out for pirates and preventing invasions.

Adaptation phase: After humans become sedentary by observing nature, modifying its customs, and natural resources are optimized and begin to coexist within the framework of the city.

Conquest phase: Humanity has knowledge, training, tools, and technology at its disposal to overcome obstacles imposed by the environment and take over the territory. In some cases, this leads to the disappearance of plant and animal species.

Respect phase: Implies greater awareness for a life in equilibrium with the environment, where engineering must be managed based on environmental sensitivity and social equity.

This paper is part of a larger body of research that examines the relationship between the four phases of perception of the physical environment described above and the four states of the landscape. To understand this relationship, it is essential to identify the differences between the four following named states: original, constructed, destroyed, and reconstructed landscapes. This paper will use the following definitions, which were developed by Martín [4] within the context of the littoral panorama.

Original landscape: The concept is to defend exceptional places within an objective concept and dimension. It responds to the concept of “protected” in certain bibliographic sources.

Constructed landscape: The concept combines nature and construction works, illustrating the evolution of the natural environment as a social and cultural force. It responds to the concept of “cultural” in certain bibliographic sources.

Destroyed landscape: “Abandoned”. This consists of the disappearance of the natural and territorial area of the city and nature in all its aspects, from social to environmental, from sustainable to communications.

Reconstructed landscape: It consists of rehabilitating, dismantling, and returning the “place” to its exceptional and objective scenario and horizon “reconquered”.

Coastal Erosion

Coastal erosion is the result of human activities and natural changes that disrupt the balance of coastal dynamics, including waves, currents, and wind—long-term sediment loss results in a retreat of the coastline and beach erosion [5]. Two conditions must be met for coastal erosion to occur: a strong current flow that moves the bottom sediment and an imbalance between the sediment supply and loss. In order to prevent further erosion, it is necessary to analyze the mechanisms that give rise to these conditions [6].

Coastal Accretion

Coastal accretion is defined as the process by which sediments accumulate at a specific coastal location, resulting in a shift of the coastline seaward. This phenomenon can occur naturally or as a result of human activities, such as the direct deposition of sand to widen beaches or the construction of ports and artificial islands. Precisely, Martín et al. [7] show that land reclamation, particularly for the purpose of constructing harbors, is a pervasive phenomenon, predominantly in China, Japan, Korea, and the Persian Gulf.

Study Area

Rio de Janeiro, established in 1563, is a city with a rich historical legacy and a port serving as the capital of the state of Rio de Janeiro in Brazil. The city of Rio de Janeiro is situated on the Atlantic coast in southeastern South America, between the longitudinal coordinates $43^{\circ}00'00''$ and $43^{\circ}20'00''$ W and latitudinal coordinates $22^{\circ}40'00''$ and $23^{\circ}05'00''$ S. Its coastline and Guanabara Bay feature a distinctive habitat formed by the interaction between Atlantic Forest species and oceanic sand plains, locally known as restingas (sand spit) [8]. These restingas (sand spits) are formed by the process of sediment deposition along the coastal plains of the seas and oceans. The sediments, particularly sand, which constitute the limestone soils of this ecosystem, were deposited primarily by the action of ocean water.

The morphology of the coastline presented changes during the Quaternary period (late Pleistocene and early Holocene) due to sea level variations resulting from glaciations and interglacial periods in which global warming occurred [9]. These changes included the formation of inland salt lagoons resulting from the closure of primitive bays or coves of small to medium size, as well as the development of dune lines parallel to the coast.

This work was developed on a littoral area formed by the Guanabara Bay (Figure 1), which extends along the east coast of Rio de Janeiro City, south of Duque de Caxias, Magé y Guapimirim, and along the coast of Sao Gonçalo and Niteroi.

Guanabara Bay is one of the largest on the Brazilian coast, with an area of approximately 384 km^2 , 131 km of coastline (94 km to this research boundaries), and a mean water volume of $1.87 \times 10^9 \text{ m}^3$ [10]. It is one of Brazil's most important bays due to its growing shipping activity. This is driven by both foreign and domestic trade, as well as oil and gas operations. The bay's supply vessels and tankers handle nearly 20% of all Brazilian imported oil [11]. The total length of this study's coastline is approximately 331 km (Table 1), which corresponds to the inner coastline of the bay, the coastlines of the islands located within the bay, the Copacabana coastline, and the coastline leading to Piratininga beach, situated southeast of the bay. The Copacabana coastline is also under the jurisdiction of the State of Rio de Janeiro, yet it is exposed to the action of the Atlantic Ocean in an unobstructed manner. The continental coastline is approximately 232 km in length, while the coastline of the islands is approximately 99 km.

Georeferenced location of the Guanabara Bay and Rio de Janeiro (east coast) in Brazil

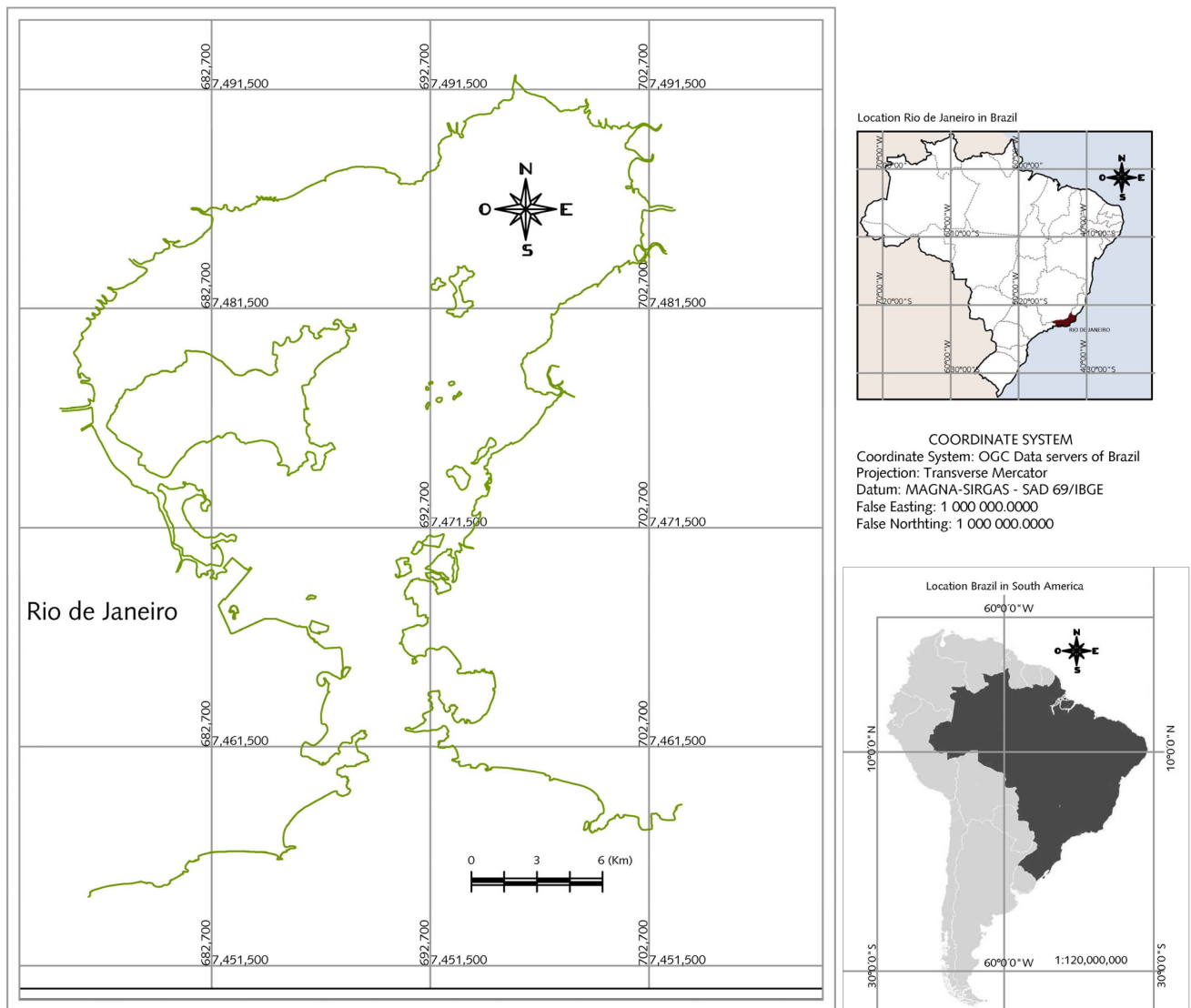


Figure 1. Georeferenced location (plane coordinates) of Guanabara Bay in the S of Brazil. Brazil is located in South America at the bottom right (geographic coordinates). Elaborated with QGIS v3.4.8. OGC data servers of Brazil. Brazil’s official reference system (datum) is the MAGNA-SIRGAS—SAD 69/IBGE.

Table 1. Coastline, study length. Source: Own compilation 2022.

Study Length (Coastline 2022) [km]			
Piratinga—Niteroi—Sao Gonzalo	Continent	82	100
Piratinga—Niteroi—Sao Gonzalo	Island	18	
Northeast Guanabara Bay	Continent	82	
Northeast Guanabara Bay	Island	12	94
D. Caxias—Copacabana Beach	Continent	68	
D. Caxias—Copacabana Beach	Island	69	137
Continent		232	
Island		99	331

According to Canedo de F. Pinheiro, E. [12], geological and geographical research indicates that approximately 10,000 years ago, the sea level was approximately 130 m lower than it is today [13]. Over millennia, the submerged continental shelf has undergone significant changes. During this period, the area has been subject to the formation of resting areas (sand spits: sandy coastal vegetation), cliffs, and dunes. This landscape was home to a diverse array of megafauna, including mastodons, saber-toothed tigers, giant armadillos, and six-meter-long sloths [14]. The disappearance of these animals remains uncertain. One hypothesis is that it was due to food shortages during the last ice age. Another is that they were unable to survive the rising Atlantic Ocean waters on the continental shelf. Nevertheless, approximately 12,000 years ago, the flooding event resulted in the formation of Guanabara Bay [15]. Conversely, the bathymetry of the bay has undergone significant modifications since its inception. Studies conducted by Kjerfve et al. [16] indicate the presence of a central channel with a depth of 30 m. However, Araruna et al. [11] have identified the occurrence of extensive mud deposits within the interior parts of the bay, which they attribute to the accelerated transport of fluvial clastic materials to the bay as a result of anthropogenic activities in the drainage basin. The active transport of fluvial clastic materials to the bay, accelerated by anthropogenic activities in the drainage basin, has resulted in a bay-averaged water depth of 5.7 m. According to Muehe et al. [17], the average depth of the bay is approximately 3 m in its most inland section, 8 m in its central part, and 17 m in the entrance channel. Figure 2 was obtained using a Chart Viewer tool, a platform developed and managed by Navionics, Inc., and Navionics S.r.l. This figure shows the bathymetric map of the entrance channel to the bay. The channel exhibits a depth of up to 50 m in select locations. However, as one progresses further to the bay's banks, the depth gradually diminishes to an average of 30 m at the channel. This reduction in depth persists until it reaches the coastline.

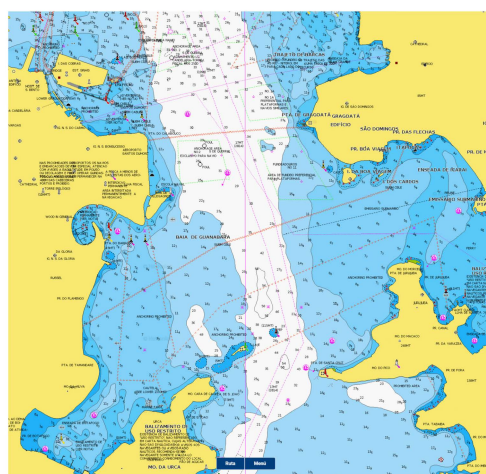


Figure 2. Bathymetric map of the entrance channel to Guanabara Bay. Source: Navionics, Inc. and Navionics S.r.l.

The sedimentary mineralogy of the interior of Guanabara Bay is predominantly composed of sand grains with a spheroidal shape, primarily consisting of quartz, feldspar, and amethyst. Furthermore, the sedimentary deposits include calcareous shells in the form of plates of varying sizes. The sedimentary deposits from the southeastern region of Governador Island exhibit a higher density than those from the northwestern region [11].

The beaches of Guanabara Bay are located in a low-wave energy environment, protected from high-energy events but not immune to them. The beaches closest to the entrance of the bay, or positioned in front of the wave entrance, are dynamic and even vulnerable to wave energy. The others, located at the bottom of the bay, have very low dynamics [18]. In the inner bay, storm effects are sporadically felt at Flamengo and Botafogo inlets and at Ingá and Icarai shores in Niteroi. At Ilha do Governador, the east-facing shore suffers

some effects of the local wave action generated by the northeast wind associated with water piling that may flood the beach shore. In general, however, the interior of the bay is protected, mainly from the action of southeast storm waves [19].

In the case of beaches in densely urbanized and modified urbanized regions, sand can spill onto sidewalks and avenues, causing damage such as the breakage of buried pipes and the destruction of sidewalks and other public assets. When cleaning streets and sidewalks, sand is not always returned to the environment, which, in the long term, can lead to a decrease in sand reserves and create a tendency to erosion. The most frequent undertows occur between the months of March and August along this part of the coast (Niteroi), according to historical records dating back some 107 years [20]. On some occasions, the swells that hit Guanabara Bay cause a beautiful spectacle of high and successive waves, suitable for surfing. One of them was recorded by the Surfar Magazine team (May/June 2010) on 8 April 2010, when the bay was hit by southeast swells with periods of 12 and 13 s, which, upon entering the bay, caused waves of 5.5 to 5.8 m in height. On this occasion, as in other works, such pipelines and boardwalks were damaged [19].

The wave climate that characterizes the south coast is conditioned by frequent changes in wind conditions, associated with the passage of cold fronts and the constant presence of swells generated by storms in the high latitudes of the South Atlantic and dissociated from the local wind [21] cites; as an example of extreme cases, for Rio de Janeiro, periods of swells from the south quadrant from 10 to 16 s with significant heights of up to 4 m.

The climate of Rio de Janeiro state is tropical, with year-round rainfall peaking in the summer, which also experiences the highest temperatures. The coastal climate is influenced by two meteorological phenomena: the Atlantic Tropical High-Pressure Mass, which brings hot and humid conditions and intense summer heat, and the Atlantic Polar Mass, which brings cold conditions, especially from May to September, causing sharp temperature drops that can last up to a week [22].

The State Institute of Environment of Rio de Janeiro (State Institute of the Environment—INEA) used data collected over three years to perform the water quality analysis. With limited sampling, the results of Figure 3 show that the mouth of Guanabara Bay (Region 2) was the region with the highest score (71%); this area includes regions near the coast at the mouth of the bay on both the western (Rio de Janeiro) and eastern (Niteroi) sides. The central channel (Region 1) was the second highest scoring region (65%), as this region has high oceanic scour in the deep central channel of the bay, which extends from the oceanic entrance of the bay to Paqueta Island. Oceanic scour helps remove nutrients and sediments from this region and keeps dissolved oxygen levels high. However, the central margins of Guanabara Bay (Region 3) achieved an average overall score (56%) due to the presence of the ports of Rio de Janeiro and Niteroi, which are situated in dredged channels and are affected by the presence of boats. The region north of Guanabara Bay (Region 4) achieved the second lowest score (47%), which was attributed to the shallow water and mangrove habitats from the mouth of the Iguaçú River to Itaoca, which are subject to numerous pollution inputs that increase nutrient levels and decrease dissolved oxygen. Finally, the northwest of Guanabara Bay (Region 5), situated west of the mouth of the Iguaçú River, was the lowest scoring region (19%), generated by the channels separating Governador and Fundao islands. These channels contain excess pollution and degradation due to their poor circulation and shallow depth [23].

Historical Description of Study Area

The Guanabara region was first inhabited by “sambaquis men” around 2 million years ago during the Pleistocene, followed by the Tapuias, and later by the Tupi or Tupi-Guarani (specifically the Tupinambás) until the Europeans arrived in the 16th century. At that time, the Tupinambás population was about one million, with approximately 15,000 Tamoiós living along Guanabara Bay. The Portuguese, led by Gaspar de Lemos, arrived in Rio de Janeiro on 1 January 1502, and named the city port after their landing date. During colonization, the Portuguese often clashed with the French, who tried to claim part of the territory, leading the Portuguese to construct defenses to protect their coasts [24].

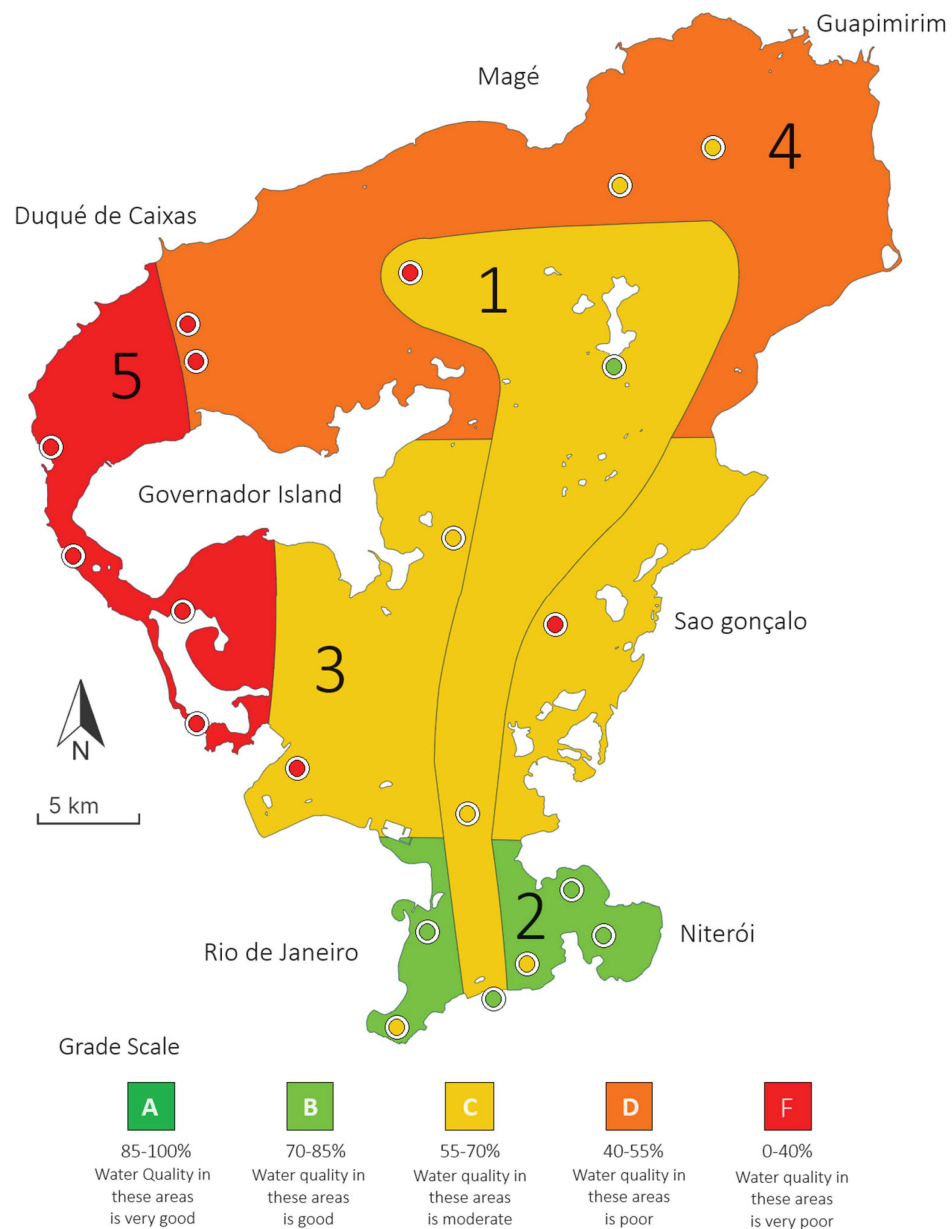


Figure 3. Water quality of Guanabara Bay. Source: The State Institute of Environment of Rio de Janeiro (INEA) [23].

In Brazil, as in numerous other colonies, the economic model that emerged during the initial centuries of Portuguese rule was centered on the extraction of natural resources. Common activities included the harvesting of brazilwood (“Ibirapitanga” or “pau-brasil”) for dyes and whaling. All parts of the whales were utilized for various purposes, including food and construction. Furthermore, the Europeans perceived the necessity to subdue the local environment despite its perceived beauty. This was due to the presence of enemy indigenous tribes, fierce and poisonous animals, frightening storms, intense heat, and insects that transmitted unknown tropical diseases [12].

The cultivation of sugar cane and the slave trade brought significant wealth to Brazil, leading to the occupation of inland areas along the riverbanks used to transport sugar to Europe via Rio de Janeiro. In the early 19th century, the invasion of the Iberian Peninsula by Napoleon prompted Prince Regent Juan de Braganza to relocate the Portuguese court to Brazil. This resulted in Rio de Janeiro becoming the capital of the Portuguese Empire. Following the Queen’s demise, Juan ascended to the imperial throne as Emperor João VI,

presiding until his abdication in favor of his son Pedro I. Pedro I, in turn, declared Brazil's independence on 7 September 1822. In 1831, Pedro I abdicated the throne in favor of his son, Pedro II, who ruled for nearly fifty years and implemented significant changes in Rio de Janeiro. The abolition of slavery gave rise to a new Republican movement, which ultimately led to a military coup on 15 November 1889, resulting in the emperor's exile. Subsequently, Rio de Janeiro became the capital of the newly established government. In the early 20th century, Prefect Francisco Pereira Passos implemented a beautification and sanitation plan, which included the construction of a new port and the transformation of the city's coastline. The influx of individuals from rural areas resulted in the emergence of the inaugural "favelas" on the hillsides. In the early 21st century, the evolving needs of the city's inhabitants and visitors have driven continuous change.

Evolution of the Littoral Landscape of Study Area

The coastal landscape of Rio de Janeiro underwent the following three principal phases of evolution: initial fortification during the colonial period, technical and aesthetic improvements by the Portuguese Empire, and later developments in the republican period. As a strategic hub between Europe and South American ports, Rio de Janeiro attracted settlers who exploited tropical resources along the rivers of the Baixada Fluminense region, using these waterways for local and export transport. Over time, the accumulation of sediments in Guanabara Bay resulted in a reduction in navigability. The population growth that occurred in the 19th century resulted in a significant erosion of the bay's shoreline, the destruction of mangroves and swamps, and the disruption of the bay's environmental balance. The construction of the Port of Rio de Janeiro and the drainage of mainland lagoons contributed to the exacerbation of urban flooding. The deforestation of the Atlantic Forest resulted in the clogging of rivers, thereby reducing their connectivity with the city. Consequently, rail and later automobile connections were established to maintain links between the residents of Rio de Janeiro and those of the surrounding region [25].

The western coast of the bay was not a continuous line of land in the 18th century. Rather, it was the result of the filling that occurred in the latter half of the 19th century. The initial formation of this part of the coastal bay was the result of the construction of islands and small sacs (small coves) in the towns of Gamboa, Saúde, Santo Cristo, and Caju, particularly between Morro da Conceição and Saúde. This was a response to the incursions of French corsairs in the bay.

The coastline of Rio de Janeiro underwent significant alterations in the early nineteenth century as a consequence of the growing popularity of sea bathing. This practice subsequently gained significant traction following the arrival of the Royal Family in 1808. In the nascent stages of the practice, sea bathing was conducted in locales such as Caju Beach and Santa Luzia Beach. In the early nineteenth century, a bathhouse was constructed at Caju Beach for Prince D. João VI, and the inaugural royal beach hotel was established there. Santa Luzia Beach, which had previously been a neglected area due to the presence of nearby facilities that were considered undesirable, began to improve in 1852 with the inauguration of a hospital and the relocation of a cemetery. In 1859, the German Gymnastics Society was established at Santa Luzia Beach, and the area subsequently became a popular destination for regatta clubs and sea bathing. The inaugural Brazilian hotel, Hotel Pharoux, was constructed in 1814 in the vicinity of the present-day Praça XV. During the colonial period and into the early 19th century, the Valongo dock in this region served as a warehouse for slaves and salt [26].

The Copacabana neighborhood in Rio de Janeiro's southern region was originally a vast, arid expanse of sand known to the Tupi Indians as *soco-apê-nupã*. The transformation of the area commenced at the end of the nineteenth century, particularly following the construction of the Old Tunnel in 1892, which connected Botafogo and Copacabana. The Pereira Passos Reform facilitated greater accessibility to the open beaches in the South Zone, while the incorporation of those beaches into the port area rendered sea bathing in the city center impractical [27]. To the south of these desolate beaches, the Copacabana Fort was constructed at the beginning of the 20th century and served as a defensive system for

the city of Rio de Janeiro and its port. The construction of the structure was completed in 1914. From this point to Ponta do Leme, the Copacabana coastline is developed, largely articulated by the Avenida Atlântica.

At the beginning of the 19th century, the coastline of Rio de Janeiro's Central Zone, situated between the present city center and the Botafogo embayment, underwent a significant transformation. The process of land reclamation resulted in the extinction or modification of several beaches. The damage caused by sea storms at beaches such as Saúde and Glória led to further coastal works being undertaken. In the early 20th century, the sinuous coastline with small gulfs and pocket beaches was replaced by a straightened, walled shoreline, which eliminated sandy areas and sea bathing spots. This transformation facilitated the renovation of the port and the construction of Avenida Beira Mar, which commenced in 1906 as part of Mayor Pereira Passos' reform. The initial significant land reclamation project, completed in 1922, involved the utilization of land from the dismantling of the Senate and Castle hills and included the construction of a seawall at Flamengo Beach [28]. The waterfront transformations in Rio de Janeiro were carried out according to the specifications of the renowned Brazilian artist and naturalist Burle Marx. These changes were implemented between 1930 and 1980, with the specific aim of transforming the built landscape of the city.

In 1923, the Copacabana Palace Hotel was inaugurated in the central area of Leme Copacabana beach. In contrast to the beaches at the entrance of Guanabara Bay, Copacabana exhibited distinctive geomorphological characteristics. By the 1940s, urbanization had begun along the entire beach promenade, resulting in a transformation of its landscape. The area was previously occupied by fishermen and covered by dune fields, with houses built close to the coastline. This led to damage from wave attacks during sea storms due to the narrow foredunes and sand strip. Two significant projects had a profound impact on the coastline of Copacabana: the establishment of Flamengo Park in 1965 and the artificial replenishment of Copacabana Beach between 1970 and 1972. Flamengo Park, a 1,200,000 m² landfill, was constructed using material from a dismantled hill. The beach nourishment project's aim was to protect buildings and the parallel Avenida Atlântica by adding approximately 5 million tons of sand, increasing the beach width from 55 m to 90 m [29]. Despite its success, the artificial nourishment did not prevent the occurrence of erosion on the western end of the beach [28]. Figure 4 illustrates the evolution of the landscape as perceived by graphic artist Carlos Gustavo Nunes Pereira, better known as GUTA.

Avenida Brasil represents a significant expressway in Rio de Janeiro, constructed in 1941 and designated as the federal highway in 1948, linking the city to Petrópolis. Spanning 58.5 km, it is the longest avenue in Brazil. At the present time, only a 2.3 km section of the avenue retains the designation "Avenida Brasil." This section is situated between Avenida João XXIII in Santa Cruz and the access point to the BR-101. Since its inauguration in the 1940s, the avenue has served as a vital transportation corridor, accommodating a diverse range of modes of travel, including trains, buses, vans, motorcycle taxis, automobiles, and trolleys. The avenue offers a contemporary driving experience and vistas of the waterfront [31]. The construction of this avenue commenced with the first built stretch, which extends in a south–north direction between the suburbs of Leopoldina, which was already in the process of consolidation at the time of construction, and Guanabara Bay (currently between the Cordovil Intersection <Av. Brasil, 640> and the Gasômetro Viaduct <Av. Brasil, Caju>), works were carried out that included landfills in the sea. As documented by Abreu [32] in the early 20th century, the sparsely populated and largely undeveloped muddy coastline of Rio de Janeiro witnessed a notable surge in the formation of informal settlements. By the mid-20th century, this trend had become particularly pronounced. The Complexo da Maré was established in this area, built on landfills and mangroves, and populated by impoverished individuals attracted by local industries and accessible transportation to the city center. The low-lying coastal region is now traversed by a number of major road infrastructures, including the Gasômetro viaduct, which connects

to the Rio-Niteroi bridge; the Red Line, which links the southern zone with the Rio-São Paulo highway; the Yellow Line; and the Transcarioca BRT viaduct, which crosses the suburbs to Barra da Tijuca in the western zone [33].



Figure 4. Evolution of Copacabana, by artist Carlos Gustavo Nunes Pereira—GUTA. Source: City Hall data warehouses and IPP (Pereira Passos Institute) [30].

The construction of the Urca neighborhood in the vicinity of Sugar Loaf has resulted in a notable alteration of the coastline in Rio de Janeiro. The new area was created through the process of landfill, utilizing sand from Guanabara Bay as the primary material, which was then deposited on the cliffs. The project was notable for its considerable scale, its proximity to the iconic Sugar Loaf, and for establishing a new trend of urban expansion towards the open coast to the south [34].

Human activity has significantly transformed the coastal landscape, extending changes to the islands within Guanabara Bay, particularly Governador Island. The most notable transformation was the establishment of Galeão International Airport, which was originally constructed as the Naval Aviation School on 10 May 1923. During the Second World War, the airport was transformed into a military base, with extensive upgrades to the runways, hangars, and terminals. These modifications were made in anticipation of a future transition to civilian use. By 1952, it was operating as Rio de Janeiro's primary entry port. In 1977, the airport handled all international traffic, with a new terminal opening and the old terminal remaining under military control. In 1985, São Paulo airport assumed the majority of international traffic, but Galeão regained prominence with the implementation of compulsory stopover legislation. In 1991, the airport underwent a renovation in preparation for the Earth Summit. In 1999, a second terminal was constructed, expanding the airport's capacity. Further enhancements were implemented subsequent to 2014, including the construction of a second runway, in anticipation of the 2016 Olympics [35]. Governador Island, the largest island in Guanabara Bay, has been experiencing coastal erosion issues over the past few decades. The erosion is primarily the result of the construction and assembly of seven pipelines traversing the island from the principal oil terminal on Ilha

D'Água to the Duque de Caxias Refinery (REDUC). The expansion of urban and industrial activities associated with the oil and gas industry has contributed to the exacerbation of erosion problems [36].

Paqueta Island is one of the islands that has exhibited the least change in its coastal shoreline from the colonial period to the 21st century.

Fundao Island, situated in Guanabara Bay and a constituent part of Rio de Janeiro city, Brazil, is the consequence of an artificial embankment constructed on the site of a former archipelago. The construction of this embankment commenced in the early 1950s (1949–1952) [37]. The islands that constituted the archipelago were designated Catalão, das Cabras, Fundão, Pindaí do Ferreira, Pindaí do França, Bom Jesus, and Sapucaia. The artificial embankment was constructed with the objective of providing housing for the Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ). Figure 5 illustrates an overlay of the current island of Fundão with the archipelago prior to the inter-island fills.

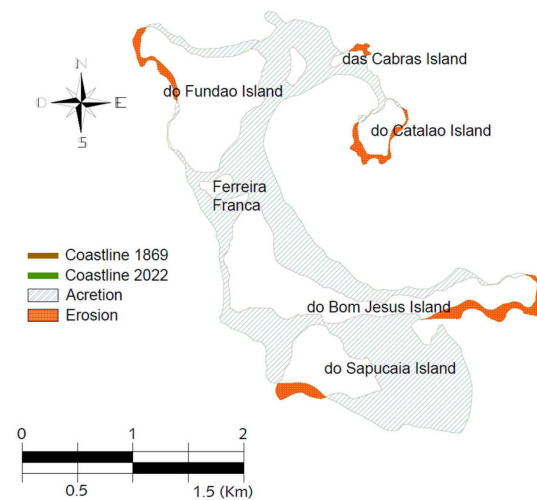


Figure 5. Superposition of the current island of Fundão with the archipelago conformed by Catalão, das Cabras, Fundão, Pindaí do Ferreira, Pindaí do França, Bom Jesus, and Sapucaia Islands, prior to the construction of the artificial barrier. Source: Own elaboration.

The interior of Guanabara Bay is home to a multitude of islands and islets, the precise number of which is difficult to ascertain. According to specialist Elmo da Silva Amador [38], the number of islands and islets in Guanabara Bay in the 16th century was 127. However, today, that number has been reduced to approximately 65. The history of the transformation and expansion of the city of Rio de Janeiro is marked by a series of landfills and other human interventions in the city's landscape. As a consequence of this process, 36 coastal islands situated in close proximity to the coastline were eliminated. The archipelagos of Ilha do Governador and Paquetá were the most resilient to the historical process due to their location. A number of other islands in the bay were also lost when they were incorporated into the mainland through the construction of artificial landfills. One such island was Ilha do Fundão, which was subsequently transformed into the Cidade Universitária following the landfill of seven other islands in the vicinity, as previously mentioned. In the present day, a significant proportion of Guanabara's islands are utilized for the purposes of naval facilities, oil terminals, and shipyards.

The urbanization of the east and southeast coasts of the state of Rio de Janeiro has been a continuous process driven by the expansion of the urban area, particularly in cities such as Niteroi, Cabo Frio, and Macaé. This expansion has been facilitated by the construction of the bridge over Guanabara Bay between Rio de Janeiro and Niteroi in 1974, oil exploration in the Campos Basin, and the growth of tourism. In light of the aforementioned considerations, the potential for the implementation of artificial beach nourishment has been proposed on several occasions, contingent upon the identification of suitable sediment sources [39]. The

artificial beach nourishment has been implemented in Piratininga Beach, which serves as the starting point for the present study.

The colonial fortifications, which correspond to the constructed landscape according to this research group, were initiated in the 16th century and definitively transformed the east coastal landscape of Rio de Janeiro and Guanabara Bay. The original landscape, comprising exuberant forests, pristine waters, and small inlets, was irrevocably transformed into one of the most visited cities in the world, where the constructed, destroyed, and reconstructed landscapes coexist.

Figure 6 depicts the coastline in 1869, beginning at Cape La Gavia and continuing through Fort San Juan, where it enters Guanabara Bay, and ending at Fort Santa Cruz, the point of exit from the bay. Figure 7 corresponds with an image produced from aerial photographs obtained from Google Earth during the year 2022, which provides a more up-to-date representation of the coastline. Figure 8 illustrates the superimposition of the coastlines, depicted in varying tones and line types, to demonstrate the impact of human activities on the coastline. These activities include the construction of ports, whether for use as air or sea terminals, sports or recreational facilities, or the loss of land due to mangrove deforestation. Similarly, the principal locations that will be utilized to orient the reader are also identified.

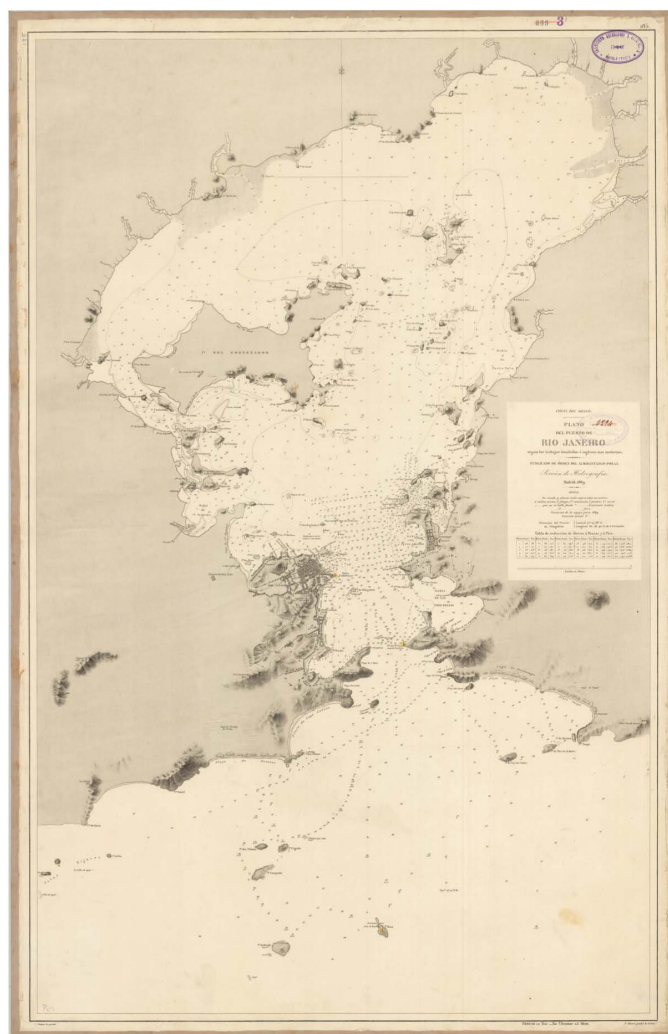


Figure 6. Map number 4294 of the Port of Rio de Janeiro, as published in the Brazilian and English works by the Hydrographic Section of the Admiralty in Madrid in 1869. Source: National Geographic Institute, Hydrographic Section, Madrid, 1869 (<https://www.ign.es/web/catalogo-cartoteca/resources/html/000953.html>, accessed on 4 June 2021).

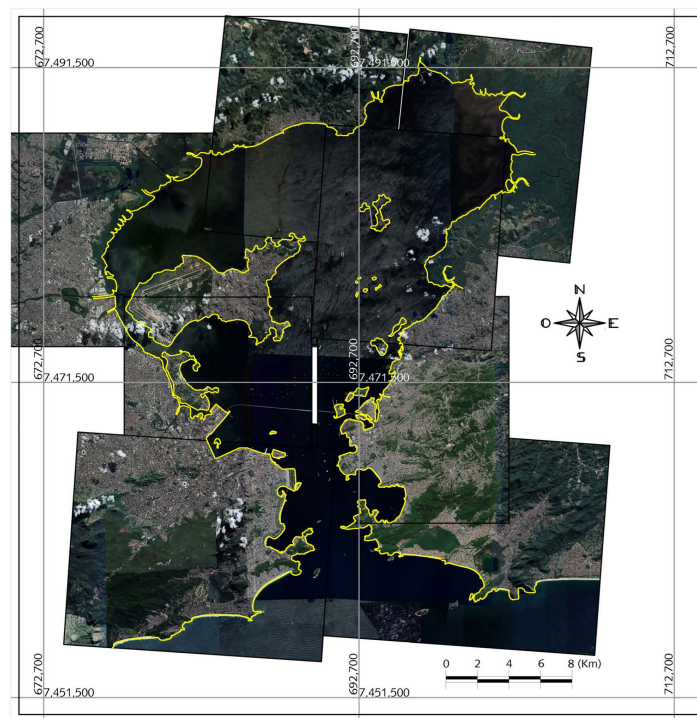


Figure 7. 2022 aerial photographs. Eight sites (framed) that correspond with the important places analyzed in this paper. Source: own elaboration, taken from Google Earth.

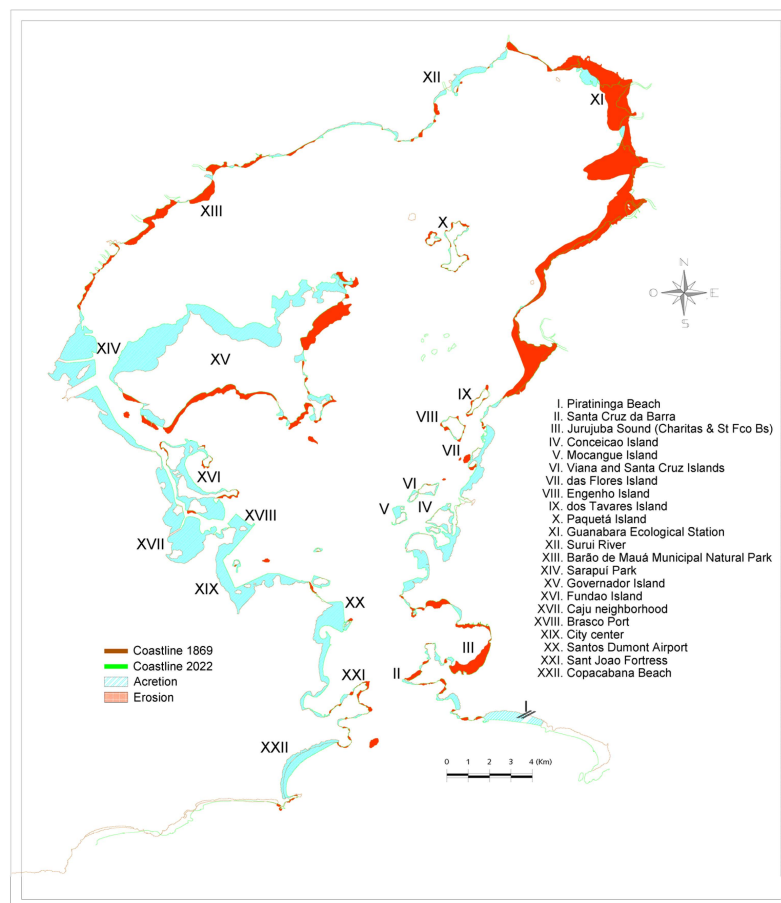


Figure 8. Coastline superimposition of the vectorized cartographic plans of 1869 and 2022. Source: own elaboration.

2. Materials and Methods

The methodology employed is identical to that utilized by this research group in their study, “Comparing the Effects of Erosion and Accretion Along the Coast of Cartagena de Indias, Colombia” [3]. The methodology requires two plans of the study area to be compared in order to show the changes to the coastline and to evaluate and quantify the area between the analyzed coastlines. For the purposes of this case study, the map in Figure 6 has been employed, which corresponds to the 4294 maps of the Port of Rio de Janeiro. This map was utilized in accordance with the Brazilian and English works published by order of the Admiralty by the Hydrographic Section in Madrid in 1869. As previously stated, the figure depicts the coastline in the year 2022.

The georeferencing of historical maps and current images was conducted using the Free Software Geographic Information System (QGIS). This software accesses remote information via OGC data servers in Brazil and utilizes Brazil’s official reference system, MAGNA-SIRGAS. The georeferencing employs a Transverse Mercator projection with the SAD 69/IBGE geodetic datum. The accuracy and precision of georeferencing are contingent upon the presence of control points that satisfy the following criteria: (i) The control points must be unequivocal and clearly identifiable. (ii) The control points must belong to accurately represented elements. (iii) The control points must correspond to elements that are considered to be invariable over time. (iv) The control points must have a homogeneous and uniform distribution across the study area [40].

The maps were vectorized using AutoCAD 2013, a computer-aided design software for two-dimensional drawing. A georeferenced plan was exported from QGIS to AutoCAD, converting the geographic coordinates into plane coordinates. Emphasis was placed on ensuring that the vectors matched the real plan’s scale accurately. The spatial objects, captured as polygonal geometries, were adjusted manually to the raster image using the zoom tool for precision. The vector precision for digitized plans is based on the minimum details of $0.2 \text{ mm} \times E$, where E is the plan scale’s denominator. The 0.2 mm constant represents the average minimum separation discernible by the human eye, resulting in a maximum real error of 0.4 m. Each vectorized coastline was assigned specific attributes for the calculations, with negative values indicating erosion and positive values indicating accretion. Upon overlaying the maps, areas exhibiting significant changes in coastline were identified. A historical analysis was conducted to observe the detailed evolution of the coastline in these areas. The extent of the coastline variations was quantified, thereby enabling the calculation of the area of change between coastlines. The estimated error was less than 5%, which is consistent with previous research conducted by the group. Table 2 shows the main anthropogenic actions on the coast of the study area.

Table 2. Chronology of anthropogenic actions on the coast.

Century	Year	Action
XVI	1502	The Portuguese arrived in Rio de Janeiro
XVI	1565	Rio de Janeiro Foundation
XVII	1612	Construction of the Santa Cruz Fort in Niterói
XIX	1808	Relocate the Portuguese court to Brazil
XIX	1814	Hotel Pharoux construction
XIX	1852	Construction of hospital and relocation of a cemetery.
XIX	1859	Gymnastics Society was established at Santa Luzia Beach
XIX	1892	Construction of the Old Tunnel
XX	1902–1906	Pereira Passos Reform
XX	1914	End of construction of the Copacabana fort
XX	1920	Development of the Copacabana neighborhood with the urbanization and construction of residential buildings
XX	1922	Construction of a seawall at Flamengo Beach
XX	1923	Inauguration of the Copacabana Palace Hotel
XX	1923	Construction of the Naval Aviation School
XX	1941	Construction of Avenida Brazil

Table 2. Cont.

Century	Year	Action
XX	1949–1952	Construction of Fundao Island (embankment)
XX	1952	Opening of the Santos Dumont Airport.
XX	1965	Establishment of Flamengo Park
XX	1970–1972	Replenishment of Copacabana Beach and construction of Avenida Atlantica
XX	1974	Inauguration of the Rio-Niteroi Bridge, connecting both cities through Guanabara Bay
XX	1980	Beginning of the urbanization and development of Icaraí beach in Niteroi.
XX	1992	Coastline reshaping for the Earth Summit
XXI	2000	Construction of the Niteroi Museum of Contemporary Art (MAC) on the shoreline
XXI	2000	Oil spill accident in Zone XIII Barao de Maua Municipal Natural Park (PNMBM)
XXI	2018	Construction of AquaRio in Port Zone

3. Results

Upon obtaining the base coastlines from the colonial period (1869 map) and the one obtained from Google Earth (2022), an overlay was performed. It was observed that it is not possible to make them fit as continuous lines. Therefore, the colonial coastline was left as a template, while the current coastline was moved to fit the lines more adequately and perform the analysis. Figure 8 depicts the overlap that best aligns with the two shorelines. Table 1 presents the shoreline sections that were the subject of the present study. Table 3 establishes the areas of accretion or erosion present in each section, as well as the final quantification. As observed, the study area exhibits favorable accretion, exceeding 14 km².

Table 3. Accretion and erosion areas in each study zone. Source: Own compilation 2022.

No.	Zone/Segment	Accretion [km ²]	Erosion [km ²]	Balance [km ²]
I.	Piratininga	1.08	0.00	1.08
	Segment between Zones I–II	0.30	−0.20	0.10
II.	Santa Cruz da Barra	0.05	−0.13	−0.08
	Segment between Zones II–III	0.21	−0.06	0.15
III.	Jurujuba Sound	0.11	−1.48	−1.37
	Segment between Zones III–IV	1.06	−0.09	0.97
IV.	Conceicao Island	0.99	0.00	0.99
V.	Mocangue Island	0.23	0.00	0.23
VI.	Viana and Santa Cruz Islands	0.17	−0.02	0.15
VII.	das Flores Island	1.09	−0.15	0.94
VIII.	Engenho Island	0.04	−0.10	−0.06
IX.	Dos Tavares Island	0.02	−0.11	−0.09
	Segment between Zones IX–X continent	0.09	−0.03	0.06
X	Paqueta Island	0.12	−0.25	−0.13
XI.	Guanabara Ecological Station	0.61	−13.52	−12.91
XII.	Surui River area	1.16	−0.55	0.61
XIII.	Barao de Maua Municipal Natural Park	0.15	−1.90	−1.75
XIV.	Sarapui Park area	5.11	0.00	5.11
XV.	Governador Island	10.79	−3.99	6.80
XVI.	Fundão Island	2.59	−0.24	2.35
XVII.	Caju neighborhood	4.01	−0.00	4.01
XVIII.	Brasco Port	1.02	0.00	1.02
XIX.	City Center continent coastline	2.52	0.00	2.52
	City Center Islands	0.25	−0.05	0.20
XX.	Santos Dumont Airport	1.26	−0.02	1.24
XXI.	Sant Joao Fortress	1.30	−0.38	0.92
XXII.	Copacabana Beach	1.47	−0.03	1.44
	Total (km ²)	37.8	−23.3	14.50

The study was conducted in a clockwise direction, commencing with Piratininga Beach and continuing through the interior of the bays, analyzing the shorelines of the main islands. The study concluded with the analysis of Copacabana Beach at the southwestern end of the bay. The following section will describe the areas in which the results were obtained with accretion or erosion values greater than 0.5 km².

Zone I, Piratininga Beach (Figure 9), is one of the most popular destinations in Niteroi, with an approximate length of 2.5 km. The beach is directly exposed to the Atlantic Ocean swell, and the surf is fairly consistent, although it tends to be flat during the summer months. The majority of the surf at this location originates from groundswells, with the optimal swell angle emanating from the southeast. As a consequence of the waves and the vulnerability of its beaches, over the past few decades, problems related to the destruction of the seawall and roads, among other structures, have occurred. Additionally, the variation in width along the beach arc suggests the action of the westward littoral drift current. The preponderant role of littoral drift currents in the longitudinal transport of sediments and the transverse displacement of sands from the beach face to the beach front, and vice versa, is the main mechanism responsible for the mobility of sediments along Piratininga Beach. In contrast, the results obtained in this area show a 1.08 km² accretion of the beach from colonial times to the present day. This can be explained by the frequent artificial nourishment of the beach as a protective measure to ensure its primary use, tourism. Given that Piratininga Beach is naturally formed by moderately selected medium sands, the artificial nourishment of this sector of the coast with borrowed sands is facilitated.

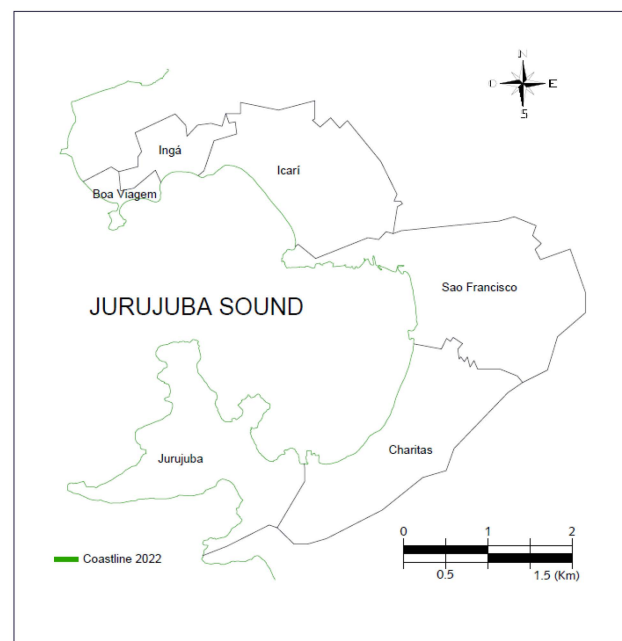


Figure 9. Bay Beaches Region (Região Praias da Baía). Source: own elaboration.

Zone III, also known as Jurujuba Sound, is part of the Região Praias da Baía. It is a small sub-bay that is sheltered by the Jurujuba promontory. The swell affecting Jurujuba Cove is primarily sourced from the south and southwest quadrants. To the north, the beaches of Boa Viagem, Flexas, and Icaraí are more dynamic, with an average wave height of 0.50 m in normal conditions and 1.5 m high in periods of swell. In contrast, the beaches of São Francisco and Charitas, located in the south, are less dynamic, with an average wave height of 0.30 m in normal conditions and between 0.50 and 0.70 m in periods of undertow. The area in question boasts a coastline length of approximately 8.000 m, with a predominant beach morphology that can be described as a ramp, exhibiting a slight slope towards the sea. This slope ranges between 11 and 14 degrees, with discrete seasonal variations that allow for the observation of small cliffs in winter, which are associated with the peaks of

the beaches. To the north of the beach, there are dunes from which, on days with strong winds, sand is blown away and can reach the promenade. The sand present on Charitas Beach is characterized by its predominantly fine size (0.125 mm, between 60–80%), with a significant proportion of very fine sand (0.062 mm). Additionally, the beach is known to host the occasional occurrence of mud balls, which can be found scattered along the beach up to the area of maximum swell reach after the occurrence of undertows. The results obtained in this area indicate a net erosion of 1.37 km².

Zone IV–V–VI North Niteroi is situated in the interior of Guanabara Bay, where the coastline is shielded from the direct influence of the Atlantic Ocean. The results of these zones again assume accretion corresponding to 2.34 km² in this section, predominantly as a consequence of the formation of ports, docks, and other anthropogenic constructions. An example of anthropic action is Zone IV, Conceição Island, which was formed from the connection of two islands. Depending on the tide, these islands could be joined or separated by a navigable channel. The island is geomorphologically formed by three main hills: the first island was occupied by Morro da Fábrica, while the second island was located at Morro do MIC (formerly Wilson Sons hill) and Morro da Capela. The connection between the two islands was established when the Port of Niteroi was constructed, utilizing sand extracted from the dredging of the pier. The sandy area that was formed was definitively filled in by the neighbors themselves as construction activities were carried out. In 1958, the connection between Conceição Island and the mainland was completed. The area of V Mocanguê Island was initially formed by two adjacent islands, Mocanguê Grande and Mocanguê Pequena. The larger island was always under the jurisdiction of the Navy, while the smaller island was home to the shipyard and workshops of the Lloyd Brasileiro Shipping Company until December 1973, when it was transferred to the Brazilian Navy by the Federal Government for the establishment of the Rio de Janeiro Naval Station in July 1977. Finally, in May 1986, the channel separating the islands was filled in, the naval station was closed, and the Rio de Janeiro Naval Base was constructed.

The balance of the result of Zones VII–VIII–IX on Flores Island, Engenho Island, dos Tavares Island, and the continental section in front of the islands is accretion. However, there are small erosion sectors. The land reclaimed from the sea due to the direct action of mankind exceeds in quantitative terms, generating a positive balance that amounts to 1.49 km². For example, the VII das Flores Island area, which was formerly known on old maps as Marim, Mariri, and, later, Ilha de Santo Antônio and Vital, 1883, was the immigrant shelter in 1932, served as a prison for officers and soldiers arrested during the Constitutionalist Revolution, in 1968 was transferred to the Secretariat of the Navy, and since 1994 has housed the Marine base. During the 20th century, there have been continuous contributions of material that have resulted in the islands becoming integrated. Together with the other islands of the archipelago, Engenho, Ananases, and Mexingueira, the island of Carvalho forms part of the Navy base. In the mainland area, where the greatest accretion of the evaluated areas occurs, a series of landfills and expropriations were carried out in the 1980s for the construction of the Niteroi-Manilha section of the BR-101 highway.

Zone X, Paqueta Island, is situated at a greater distance from the continental zone than the other islands evaluated. It exhibits erosion and accretion zones with a negative balance of 0.13 km² of land loss. Areas of erosion occur on the south side where the waters become choppy in the afternoon when the southerly winds gain strength, whereas the waters at the east and west sides remain calm. The north side of the island has historically had agricultural development and shows erosion, possibly as a result of the docks on the northwestern side that intercepted sediment transport, and the salinity of the bay water in this area decreases to 9.05 in the months of higher rainfall, also causing a decrease in mangroves and estuaries.

Zones XI and XII, which include the Guanabara Ecological Station and the Surui River, exhibit small areas of accretion, with erosion being the dominant process. In this study, the area affected by erosion reached 14.07 km², but the final balance was negative at 12.30 km², indicating a loss of mangroves in the zone. However, the two zones under study are located

in protected areas that have been subject to analysis with a view to preventing disasters that could cause damage to the natural environment. For example, the oil spill in the northwestern part of the bay in the year 2000 resulted in the migration of oil towards Suruí and Nova Orleans. This demonstrated that there is a possibility that other contaminants released in the same region may also be transported to these mangrove areas under certain tide conditions.

Zone XIII Barao de Maua Municipal Natural Park (PNMBM) has experienced erosion of 1.75 km². The PNMBM area has exhibited signs of degradation, which were exacerbated by the 2000 oil spill accident. In response, the Mangue Vivo Project was implemented, resulting in the restoration of 90 ha, which represents over 75% of the park's total area.

Zones XIV, XV, XVI, and XVII, Sarapuí Park, Governador Island, Fundão Island, and Caju neighborhood, respectively, correspond to the largest area of accretion in this study, reaching a total area of 18.27 km² of land reclaimed from the sea. The accretion area of these zones is the result of the dumping and landfills created for the construction of the Galeão International Airport on Governador Island, the construction of the Federal University of Rio de Janeiro on Fundão Island, and the formation and construction of the Caju neighborhood.

The study of this research concludes with an analysis of the following zones: XVIII to XXII, Brasco Port, the City Center, Santos Dumont Airport, Sant Joao Fortress, and Copacabana Beach, which are situated in the southeast part of the bay. The total accretion area of these zones is 7.34 km², resulting in a positive balance. Once more, the construction of fortresses, airports, and naval ports, as well as the continuous contribution of sand for the formation and maintenance of the beaches, are the primary anthropogenic factors responsible for the observed outcomes in these areas.

4. Discussion

The results were discussed in the context of previous studies conducted in the study area. Comparisons were also made with some studies that did not determine the areas of accretion and/or erosion within the coastline of the study area. However, these studies do allow for the evaluation of the dynamic behavior of the coast and its variation in terms of beach width, geomorphology, grain size, slope gradient, and other factors. Similarly, previous studies permit the corroboration of whether the location of the accretion and/or erosion areas identified in the present paper aligns with the historical development of each zone. This evidence demonstrates the impact of anthropic intervention on the coastline, providing a clear example of the coastline's variability.

The article presents a historical analysis of the evolution of the coastal landscape in response to anthropogenic influences. While the socioeconomic impact has not been considered for this case study, which limits the analysis of the consequences of coastal landscape alteration for the population surrounding the study area, this research does illustrate the historical consequences of various decisions, actions, and policies on the coastal landscape, both governmental and social. These consequences subsequently have environmental and socioeconomic implications that will continue in long-time terms.

The current configuration of Guanabara Bay is the result of the Holocene transgression, which submerged the lower reaches of the drainage network. The bay's bathymetric curves exhibit the indentations of the talvegues, which are still visible today. The bay is an area that was lowered along a fault axis that ruptured the coastal massif. The depression thus formed and opened a connection between the ocean and the Guanabara graben and served as a convergence point for the fluvial drainage network coming from the Serra do Mar escarpment and the reverse of the coastal massif [13]. The coastline is subject to change due to the influence of coastal dynamics, which, as previously stated, is contingent upon the morphology of the coastline. Figure 10, as presented by Muehe et al. [19], depicts the geomorphology of the coastline under investigation, presented in sections. This will serve as a foundation for understanding the response of each section to the behavior of the coastal climate.

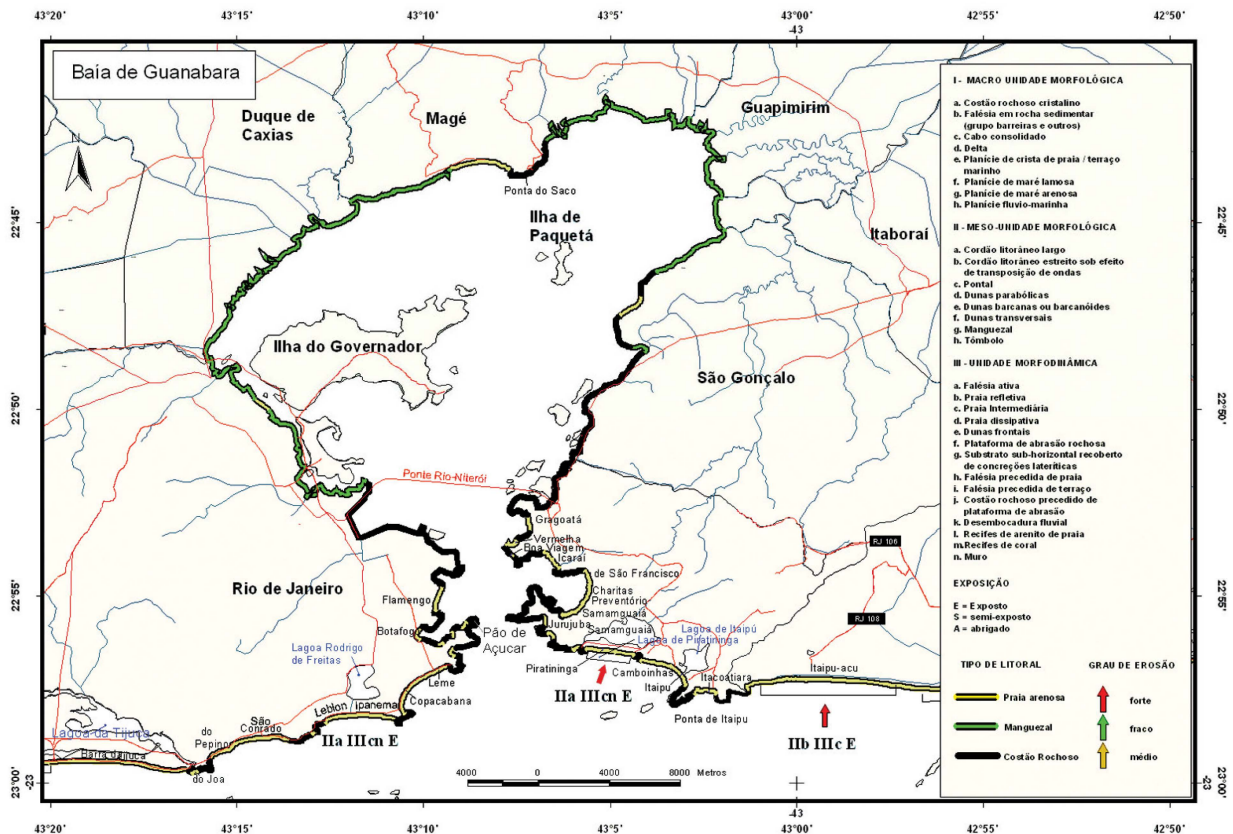


Figure 10. Coastal geomorphology of the study area. Source: Muehe, D. et al. [19].

The accretion observed in study Zone I, Piratininga Beach, with an area of 1.08 km², is in accordance with the recovery and anthropic protection works that are being carried out in the area, as well as the protection they have due to their location near the entrance to Guanabara Bay. The results are in agreement with those of Muehe and Lins-de-Barros [22], who posit that the beaches of this sector have undergone numerous interventions, including landfill, dredging, and the construction of seawalls, due to their location in heavily modified urban areas. In Niteroi, a seawall constructed on Piratininga Beach to protect against erosion has been repeatedly destroyed and rebuilt. Nevertheless, despite the presence of the wall, the beach profile maintains its position and sediment volume of approximately 300 m³/m² (Figure 11). The findings of this research team are also consistent with the studies of André Luiz Carvalho da Silva et al. [41], who, through an analysis of the beach profile in the region over the past 30 years, have concluded that, despite the exposure of the coastline, there has been no evidence of erosion. According to Silva [42], Piratininga Beach is characterized by the predominance of waves originating from the S, with occasional exceptions where SW waves prevail, plunging waves, and spilling waves. These characteristics, as Silva continues, result in profiles with a strong angle of inclination along the beachfront, with a slight variation in the profile along the beach. Additionally, the topographic profiles reflect the performance of coastal drift currents, which influence the transport of sediments to the west during the summer. During the winter, the transport of sediments narrows at the ends of the beach arc, resulting in a reduction in the width of the beach to a maximum of ±80 m. Other studies, such as those conducted by Santos et al. in 2004 [20], Bastos in 1994 [43], and Muehe in 1975 [44], also demonstrate similar beach dynamics. The analysis conducted by Santos et al. revealed a notable variation in the average width of the beach, with a difference of 15 m between the winter and summer measurements. Additionally, the study demonstrated that rip currents play a significant role in the destruction of the seawall at Piratininga Beach, with a more pronounced impact observed at the eastern end and a gradual decline towards the western end. This obser-

vation highlights the influence of rip currents on the beach width, which is derived from sand erosion. Bastos (1994) [43] observed that Piratininga Beach exhibited a differentiated dynamic behavior along the beach. The western sector of the beach was found to be more dynamic, unstable, and vulnerable to the action of tidal waves. However, it is important to note that Bastos conducted his study during the winter, a season that may have influenced the observed results. Additionally, the beach width exhibited a variation between 17 and 55 m. Furthermore, the study revealed that the beach was undergoing an erosive process during the study period, particularly at the western end. Finally, the topographic profiles created for the center of the beach arch by Muehe in 1974 demonstrated that the beach width fluctuated between 47 and 62 m. The outcomes of the various investigations conducted from 1974 to 2005 (30 years) indicated that the beach profiles have remained unaltered, suggesting that it is possible to estimate that, if during the last 30 years, Piratininga Beach has varied between 40 and 80 m in width with a tendency towards accretion, the result obtained by this research group in the analyzed period of 150 years appears to be satisfactory.



Figure 11. Piratininga Beach. The beach still maintains its position and sediment volume. Source: Marcelo Dias (<https://www.facebook.com/praiadepiratininganiteroi>, accessed on 14 April 2024).

Freshwater enters the Jurujuba Sound (Zone III) through several small channels that encircle the coastline. The Cachoeira and Icaraí rivers were classified as typical urban rivers, whereas the other channels are open sewers in which liquid discharge is maintained by mixed flows of domestic effluents and rainwater. It is typical for these channels to be highly efficient at removing suspended bedload sediment during storm runoff due to their smooth and shallow concave cross profiles and steep gradients. The erosion obtained by this research group for this area, which amounts to 1.37 km², is in agreement with previous research carried out by J. Baptista Neto et al. [45], who also conclude that whilst impacts of modern urbanization are severe, both in terms of elevated erosion/sedimentation and associated pollutants, these are not unique, and their results also show that an earlier phase of rapid nearshore sedimentation was also identified, which appears to correlate with deforestation of the coastal margin during the early stage of European colonization. In addition to slope constraints, the processes of erosion and landslide risk in Niterói are significantly influenced by the characteristics of the slope-forming materials. Each material has a distinct erosion pattern and varying slope failure threshold levels [46]. A slight tendency towards a decrease in the size of the Jurujuba Sound sand is observed, with the northern subzone exhibiting coarser grains in comparison to the finer sand observed at Charitas and Sant Francisco beaches. This phenomenon can be attributed to the differing levels of wave energy [47]. This trend appears to correspond to the processes observed in this area by previous research and the current results of erosion by this research group. The beaches are currently in equilibrium with the environmental dynamics of Guanabara

Bay and the prevailing sea level. The existing issues can be attributed to inadequate human intervention.

As illustrated in Figure 12, the road marked in red on the 18th-century map differs from the current topographic map in a number of ways, according to Soares da Costa [48]. The road in question (line red) connects the current neighborhoods of São Domingos and Ingá, traversing the hills between points B and E. It is also noteworthy that in the 18th century, this road connected two points on the Niteroi coast. However, with the construction of a coastal fill in the 20th century, this road no longer reaches the sea on the side of São Domingos, as can be seen in the comparison figure. In 1840, a new urban plan for the city of Niteroi was drawn up by the French military engineer Pedro Taulois (and approved the following year). This spatial configuration would only undergo a similar magnitude of change a hundred years later, during the Republican period, when the landfills (São Lourenço and Praia Grande) were built, artificially creating new land for public use [49]. The two studies—in conjunction with the historical documentation of the Conceicao, Mocangue, Viana, and Santa Cruz Islands, which have already been described in this paper—are in alignment with the findings of this research group for the Niteroi Norte zone (Zones IV–V–VI). The final balance of this zone was positive, with an accretion of 2.34 km². Another of the works that generated accretion of the Niteroi coastline was the construction of the Rio-Niteroi Bridge, which has 4.04 km built on the embankment (total length of 13.29 km), 50% of which corresponds to the eastern side of the bay.

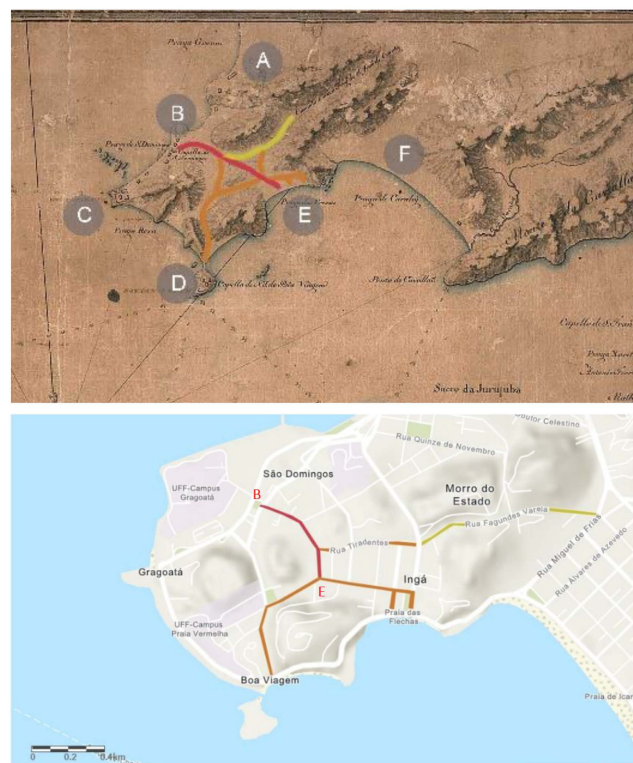


Figure 12. Top—Plan of the city of Rio de Janeiro with the most essential part of its port and all the fortified places; by Jose Correa Rangel de Bulhoens, 1796. Down—Map of the neighborhoods of São Domingos; Boa Viagem and Ingá, 2022. Source: map from the National Digital Library [cart209337] (2022) and ESRI map (2022).

The beaches in the municipality of São Gonçalo (in Zones VII–VIII–IX) are among the most severely degraded and poorly characterized of Guanabara Bay. Beira Beach, situated on the island of Itaoca, measures 330 m in length and 19 m in width. A pier was constructed on the northern boundary to support the state's oil industry, and the beach exhibits clear signs of degradation and morphological changes that are evident due to the activities conducted along this coastline. The 11 m section of the beach (with a 15° slope) exhibits a

less degraded appearance due to the tidal fluctuations, which move trash to other areas. The quartz sands at Beira Beach exhibit a gradational distribution, with medium-grained sand comprising 48% and very coarse sand comprising 41%. The proportion of coarse sand is also elevated at the beachfront, accompanied by a notable accumulation of gravel. This is in contrast to the low energy of this stretch of the sheltered coast of Guanabara Bay. The results of the analyses conducted by Silva et al. [49] indicate the presence of a bimodal sedimentary pattern, which is also observed in Praia da Luz. This pattern, as previously noted by Amador [14], is characteristic of some low-energy beaches in Guanabara Bay. As previously stated by the aforementioned author, the origin of these sediments is attributed to the contribution of the local geology, specifically the Caceribu Formation. The length of Praia da Luz beach is 1084 m, oriented southwest–northeast. The northeastern edge of the beach is notable for its abundance of mangrove vegetation. The Praia da Luz beach has a narrow ramp profile, with a width of only 13 m and an inclination of 12° with respect to the waterline. The sediments of this beach are predominantly composed of medium- to coarse-grained quartz sands, with gravels comprising 12% of the total. During the spring low tide, the intertidal zone of the beach reveals a muddy substrate with a considerable accumulation of waste. The notable presence of mud is a consequence of the proximity to the mangrove [18]. The characteristics of the beaches in this area are in precise alignment with the results of the coastal accretion obtained in this paper. Therefore, they can be considered in accordance with the geomorphology of the coastline obtained in previous studies, as well as with the contribution of material generated for the connection of the Engenho and Carvalho islands for the construction of the Marine Base and the landfills required for the construction of the BR-101 highway in the Niteroi-Manilha section.

The quantitative analysis of the northeastern portion of Guanabara Bay (Zones XI–XII), as presented by Fernandes et al. [50], indicates significant modifications in the surrounding area within the Guapimirim Environmental Protection Area. The analysis was divided into four periods: Between 1938 and 1974, the coastline exhibited a loss of 1.44 km² of water surface. Such evidence can be associated with the aggradation of the region, which occurred as a result of deforestation to provide resources in accordance with the economic models that were in place during the period under analysis [14]. In the second period of the 1974–1984 study conducted by Fernandes et al., a total of 0.65 km² was subtracted from the designated protection area. However, in the third and fourth periods, the changes in coastline are not discernible on the scale utilized for the research [50], which may indicate a reduction in the impacts resulting from the pressure of human activities on the water body [51]. According to Moraes et al. [52], the natural recuperation of mangrove ecosystems located within the limits of the Guapi River can be associated with a wider control of human actions due to the monitoring policies established. One illustrative example of such a movement is the enactment of Decree No. 90.225 on 25 September 1984, which established the Guapimirim Environmental Protection Area and the protection of its mangrove areas.

The deforestation, rectifying, and channeling of some rivers that drain into the bay, changing their course and flow rate [53], have influenced the deposition of sedimentation around the basin of Guanabara Bay [54]. It can be observed that mangroves, which previously served as effective filters in areas between tides, have been largely depleted in areas where they were once abundant [14]. The complete modification of the northeastern portion, according to Fernandes et al. [50], was approximately 2.09 square kilometers. The erosion area obtained by Fernandes et al. is considerably lower than the results of this paper. Nevertheless, it is evident that the discrepancy can be attributed to the shorter duration of the study, given that this investigation encompasses nearly a century more of cartographic analysis. Another crucial factor to be taken into account is the type of vegetation present in these areas. This corresponds to mangroves that have been directly affected by contamination and misuse by humans. Figure 13 illustrates the extent of Zones XI–XII.

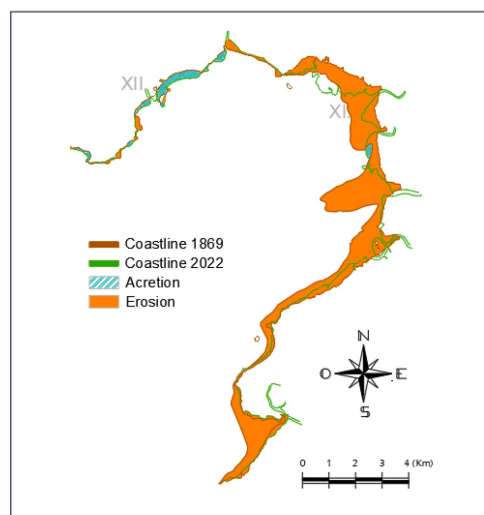


Figure 13. Zone XI and XII. Erosion and accretion areas and Manguezal do Mangroves of the Reconcavo of Guanabara Bay and APA Guapimirim Source: own elaboration and Ricardo Gomes/Instituto Mar Urbano (<https://institutomarurbano.com.br/projeto-guanabara-verde/>), accessed on 22 May 2024).

The mouth of the Iguaçú River (Zone XIII) is included in Guanabara Bay depollution plan, which is funded by the World Bank and managed by the Rio de Janeiro state government. The project entails dredging operations with the objective of enhancing water circulation and facilitating the removal of contaminated sediments from the riverbed. Notable features in this region include the Petrobras Duque de Caxias refinery and petrochemical facilities on the left bank, and the Gramacho landfill, the largest urban waste landfill in Rio de Janeiro, on the right bank. Furthermore, the majority of the rivers that flow into the bay are severely degraded [55]. With respect to the northwestern part of the bay, the low surface oxygen content in the Iguaçú River is related to existing discharges of pollutants. In summer, the bottom oxygen levels in the central and northeastern bay stations were extremely low (between 0.12 and 0.3), indicating the presence of an anoxic zone in this region [56]. Previous research has consistently demonstrated that anthropogenic activities are responsible for the erosion observed in Zone XIII of this study.

With regard to the zones from XIV to XVI, the multi-temporal analysis of the northwestern section of Guanabara Bay by Fernandes et al. [50] indicates the movement of the coastline towards the shore, resulting in the addition of areas by landing, the disappearance of Maria Angú Beach, and the incorporation of Ferreiros Island to the continent between 1938 and 1974. Additionally, between the years 1974 and 1984, a crescent-shaped movement of the coastal area occurred in the segment that begins at the base of the Rio-Niteroi Bridge and extends southwestward toward Fundão Island. The area—previously inundated and comprising tidal plains—was reclaimed, with the island of Pinheiro becoming an integral part of the mainland. From 1984 to 1997, the coastal area continued to undergo changes due to urbanization. The successive landings on the northern area of the Meriti River established a new contour of the coastline. The elevated rates of sedimentation and aggradation observed in the deforested channel between Governador Island and the continent resulted in a loss of water surface. Following the 1970s, the continued use of the landings for large engineering projects was facilitated by the economic model in place at the time [14]. The analysis of [50] also indicates that there were few discernible changes in scale between 1997 and 2015 when compared to previous periods. The Fundão Channel is also included in the PDBG, and the actions taken for this project demonstrate that the present dynamics of the evolution of Fundão Island (Zone XVI) indicate a recuperation of the environmental reservation area, a decrease in the use of grass, and an increase in the constructed area in some portions of the island. Furthermore, this study examined the impact of the construction of

the International Airport on the geomorphology of Governador Island (Figure 14). As a result of this construction, the island (Zone XI) underwent significant changes in its contour, with the addition of new areas and a larger perimeter at the northwestern side. The changes in the northwestern region (Zones XIII to XVI), as delineated by Fernandes et al. [50], covered an area of approximately 14.78 km², which is consistent with the area of 18.27 km² obtained in this research, which considers approximately 100 more years of evaluation.

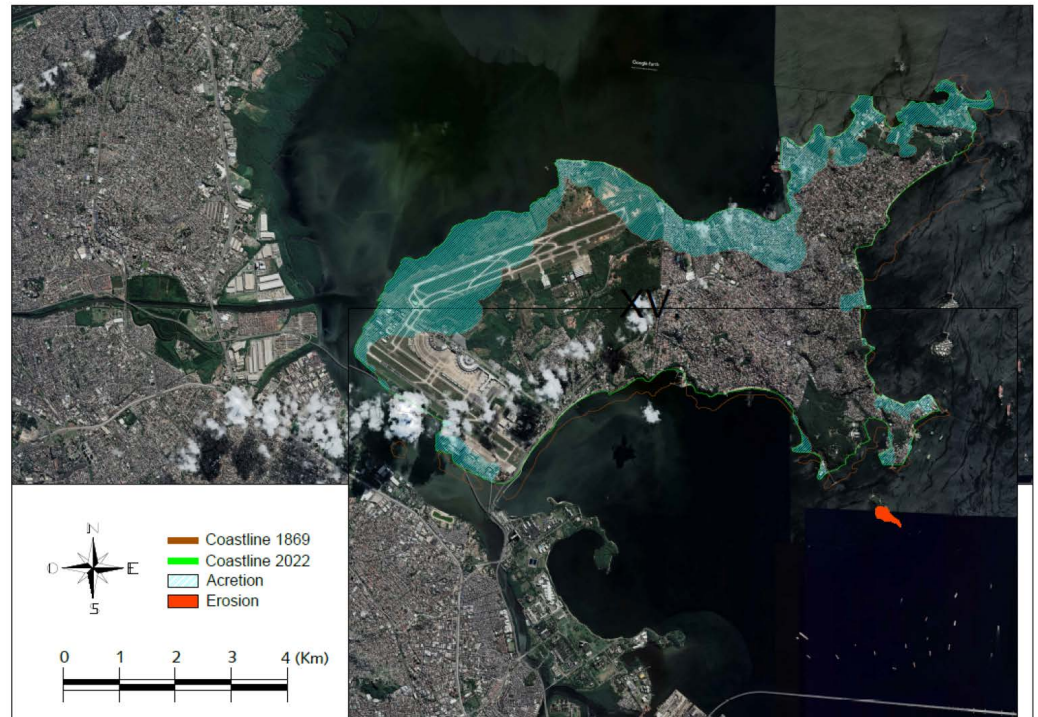


Figure 14. Accretion and erosion in Governador Island (Zone XV). Source: own elaboration, taken from Google Earth.

The coastline of the zones from XVII to XXI (Figure 15), situated between the present city center and the Botafogo embayment, including the Caju neighborhood, underwent significant alterations at the beginning of the 20th century. Some of the beaches were lost due to land reclamation, while others underwent extensive modifications to their contours. Sea storms and damages observed on some beaches, such as Saúde [25,26] and at the shore of Glória beach, encouraged work on the coastline [28]. The actions of other entities contribute to the accretion areas in the zones, including Flamengo Park. This Park was constructed on land reclaimed from the sea and consists of a network of public spaces extending along the coast of Guanabara Bay, from Santos Dumont Airport to Botafogo Bay (1.3 km²). This built edge is separated from the city by an expressway for road traffic, acoustically isolated by elevations of the land itself. Additionally, the Museum of Contemporary Art of São Paulo was constructed on a plot of land measuring 0.4 km² that was granted in 1951. This plot is located in the Flamengo atrium, adjacent to Beira Mar Avenue, in the center of the city. In order to facilitate the construction of the museum and its adjoining spaces, the hill in the vicinity was also excavated [57]. The accretion area determined by Lins-de-Barros et al. [28] was calculated and compared with the results of Rey [57] and with the findings of this research. It was found that there was agreement between the three values.

Copacabana Beach (Zone XXII) presents accretion that has been derived from a variety of sources, including the continual influx of materials that have been received over time. For instance, during the Pereira Passos administration, a strip of land reclaimed from the sea was obtained for the construction of Avenida Atlântica, which measures 4.5 km in length and is situated between the Leme and Copacabana forts. This resulted in the

concept of the reconstructed landscape may be considered reflected in the work of Burle Marx, who attempts to restore the harmony of the coastline through interwoven elements.

The interior of Guanabara Bay is protected from the effects of storms, primarily due to the presence of storm waves from the southeast that are intermittently felt in the Flamengo and Botafogo inlets and along the edges of the beaches of Niteroi. On Governador Island, the combined effect of waves generated by the northeast wind and the accumulation of water can result in flooding of the beach. However, in general terms, the changes to the coastline in the study area are largely the result of anthropogenic activities that have been conducted since the colonial period.

The anthropogenic activities have undergone significant alterations in the bay due to the accumulation of pollutants, which has resulted in the loss of mangrove areas, the construction of landfills, ports, and airports, the addition of sand to the beaches, and other human-made structures that have reclaimed land from the sea. Furthermore, such structures have facilitated the integration of beaches with the mainland.

A comparison between the western and eastern portions of the bay reveals that the greatest accretion to the coastline occurred in the western part of Rio de Janeiro city. The utilization of Guanabara Bay for industrial, oil, petrochemical, and naval purposes, in conjunction with investments in ports and shipyards, transformed the Rio de Janeiro east coastline into the most significant and most affected region of Brazil. Nevertheless, the detection and registration of modifications to coastlines also include areas that have been lost, particularly in the north (Zones XI, XII, and XIII), where a significant portion of mangroves have been affected, either by destruction or by pollution emanating from the rivers draining the Baixada Fluminense. The eastern side of the bay is characterized by the presence of artificial shorelines in Niteroi and Sao Gonzalo.

The east coast of Rio de Janeiro and the coasts of Guanabara Bay show a positive balance of 14.5 km² (+37.8; −23.3) as a result of artificial landfills for the construction of ports and airports or beaches that need a constant supply of sand to maintain their main use, tourism. However, we should not forget the importance of the area lost during the period studied, which is 23.3 km² and corresponds to the area affected by the loss of mangroves. Fortunately, in recent years, projects have been implemented to protect these areas.

This research, as a case study of a general research project on the evolution of coastal landscapes in several port cities of the American continent, demonstrates the considerable impact of human activities on the changes occurring along the coastline and the coastal landscape. It also highlights the necessity of implementing measures to mitigate coastal erosion and prevent damage associated with environmental, social, and economic losses. This research serves as a call to action for political and societal entities to engage in active participation in the aforementioned processes.

Author Contributions: Conceptualization, methodology, validation, and formal analysis S.V.G.R. and V.N.V.; investigation, S.V.G.R.; resources, S.V.G.R.; V.N.V. and J.M.d.C.; data curation and writing—original draft preparation, S.V.G.R. and V.T.N.; writing—review and editing, S.V.G.R., V.N.V. and V.T.N. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Fundación Agustín de Betancourt.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The research data are accessible to the public. To obtain the data that support the reported results, one must request it from the authors of the research.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the “Fundación Agustín de Betancourt” for their institutional and financial support.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Diez, J.J. Climatic Versus Geomorphologic Changes: Influence on Landing Processes in Eastern Coasts of North America. *J. Coast. Res.* **2001**, *17*, 553–562.
2. Prasetya, G. Chapter 4 Protection From Coastal Erosion. in Coastal protection in the aftermath of the Indian Ocean tsunami: What role for forests and trees? In Proceedings of the Compilation Proceedings of the Regional Technical Workshop, Khao Lak, Thailand, 28–31 August 2006; CFAO Regional Office for Asia and the Pacific: Bangkok, Thailand, 2007; pp. 103–131.
3. Rodríguez, S.V.G.; Valdecantos, V.N.; González, J.J.D.; del Campo, J.M.; Martín-Antón, M. Comparing the Effects of Erosion and Accretion along the Coast of Cartagena De Indias, Colombia. *J. Coast. Res.* **2021**, *37*, 1204–1223.
4. Martín-Antón, M. Obras públicas, evolución y paisaje costero. De la Situación en España al Gigantismo Asiático. Ph.D. Dissertation, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain, 2018.
5. Ye, Y.C. *Marine Geo-Hazards in China*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2017; pp. 269–296.
6. Mazda, Y.; Michimasa, M.; Miyagi, T.; Kobashi, D. Coastal erosion due to long-term human impact on mangrove forests. *Wetl. Ecol. Manag.* **2002**, *10*, 1–9. [[CrossRef](#)]
7. Martín-Antón, M.; Valdecantos, V.N.; del Campo, J.M.; López-Gutiérrez, J.S.; Esteban, M.D. Review of coastal Land Reclamation situation in the World. *J. Coast. Res.* **2016**, *75*, 667–671. [[CrossRef](#)]
8. Scarano, F.R. Structure, Function and Floristic Relationships of Plant Communities in Stressful Habitats Marginal to the Brazilian Atlantic Rainforest. *Ann. Bot.* **2002**, *90*, 517–524. [[CrossRef](#)]
9. Martin, L.; Suguio, K.; Flexor, J.-M.; Dominguez, J.M.L.; de Azevedo, A.E.G. Evolucao da Planicie Costeira do Rio Paraiba do Sul (RJ) durante o quaternario: Influencia das Flutuacoes do Nivel do Mar. In Proceedings of the Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro, Brazil, 12–19 October 1986.
10. Fonseca, E.M.; Neto, J.B.; Silva, C.G.; McAlister, J.J.; Smith, B.J.; Fernandez, M.A. Stormwater impact in Guanabara Bay (Rio de Janeiro): Evidences of Seasonal Variability in the Dynamic of the Sediment Heavy Metals. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **2013**, *130*, 161–168. [[CrossRef](#)]
11. Júnior, J.T.A.; de Campos, T.M.P.; Pires, P.J.M. Sediment Characteristics of an Impacted Coastal Bay: Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, Brazil. *J. Coast. Res.* **2014**, *71*, 41–47. [[CrossRef](#)]
12. Canedo, E.; de Pinheiro, F. Chapter 7: Guanabara Bay a look at a History, 1st ed.; Oliveira, L.A., Ed.; Museu do Amanhã: Rio de Janeiro, Brazil; Edições de Janeiro: Rio de Janeiro, Brazil, 2015; p. 123.
13. Ruellan, F. A evolução geomorfológica da baía de Guanabara. *Rev. Bras. Geogr.* **1944**, *IV*, 103–199.
14. Amador, E.D.S. *Bahía de Guanabara e Ecossistemas Periféricos: Homem e Natureza*; Amador, E.d.S., Ed.; Edição do Autor: Rio de Janeiro, Brazil, 1997; p. 539.
15. Colomb, G.; Houlbert, C. *La Geologie*; Lamego Filho, A.R., Ed.; Armand Colin: Paris, France, 1900; p. 483.
16. Kjerfve, B.; Ribeiro, C.H.; Dias, G.T.; Filippo, A.M.; Quaresma VD, S. Oceanographic characteristics of an impacted coastal bay: Baía de Guanabara. *Cont. Shelf Res.* **1997**, *17*, 1609–1643. [[CrossRef](#)]
17. Muehe, F.; Lins-de-Barros, M.; Bulhoes, E.; Klumb-Oliveira, L.A. Capítulo Rio de Janeiro. In *Panorama da Erosão Costeira no Brasil*; Ministério do Meio Ambiente—MMA: Brasília, Brazil, 2018; p. 759.
18. Silva, M.A.M.; Silva, A.L.C.; Santos, C.L.; Silvestre, C.P.; Antonio, R.V.M. The Beaches of Guanabara Bay in Rio de Janeiro State. *Rev. Bras. Geomorfol.* **2016**, *17*, 205–225.
19. Muehe, D.; Lima, C.F.; de Barros, F.M.L. *Erosão e Progradação no Litoral Brasileiro*; Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis: Brasília, Brazil, 2006; p. 476.
20. Santos, C.L.D.; Silvia, M.A.M.; Salvador, M.V.S. Dinâmica Sazonal e os Efeitos das Ressacas nas Praias de Niterói (Rio de Janeiro). *Rev. Bras. Geociênc.* **2004**, *34*, 355–360. [[CrossRef](#)]
21. Melo, E. *The Sea Sentinels Project: Watching Waves in Brazil*; ASCE: Saint Louis, MI, USA, 1993.
22. Muehe, D.; Lins-de-Barros, F.M. Chapter 14: The Beaches of Rio de Janeiro. In *Brazilian Beach Systems*; Short, A.d.F.K., Ed.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2016.
23. IAN. *The Development Process and Methods for the Guanabara Bay Report Card*; Integration and Application Network: Annapolis, MD, USA, 2017.
24. imaginariodejaneiro.com. IMAGINA Río De Janeiro, Guía de la Ciudad Maravillosa. 22 December 2022. Available online: <https://imaginariodejaneiro.com/la-ciudad-de-rio-de-janeiro/historia-de-rio-de-janeiro/> (accessed on 22 December 2022).
25. Silva, C.P. Ser “carioca”/ser “fluminense”: La creación de identidades por las fronteras político-administrativas en el espacio sudamericano. *Acta Hisp.* **2018**, *23*, 85–103. [[CrossRef](#)]
26. Gerson. *História das Ruas do Rio e da sua Liderança na História política do Brasil*; Lacerda Editores: Rio de Janeiro, Brazil, 2000; Volume 5, p. 213.
27. O'Donnell, J. *A Invenção de Copacabana: Culturas Urbanas e Estilos de vida no Rio de Janeiro (1890–1940)*; Zahar: Rio de Janeiro, Brazil, 2013; p. 255.
28. Lins-de-Barros, F.M.; Sauzeau, T.; Guerra, J.V. Historical evolution of seafront occupation in France (Bay of Biscay) and Brazil (Rio de Janeiro) face to coastal erosion vulnerability and risks (19th–21th centuries). *Confin.-Rev. Fr.-Brés. Géogr.* **2019**, *39*, 1–36.
29. Vera-Cruz, D. Chapter 80: Artificial Nourishment of Copacabana Beach. In *Coastal Engineering*; ASCE: Reston, VA, USA, 1972; Volume 13, pp. 1451–1463.
30. Barbosa, G.S.; Drach, P.R.; Corbella, O.D. Intraurban Temperature Variations: Urban Morphologies of the Densification Process of Copacabana Neighborhood, Brazil. *Climate* **2019**, *7*, 65. [[CrossRef](#)]

31. Torres, P.H.C. Avenida Brasil—Everything Passes By Those Who Don't See?: The formation and occupation of a highway suburb in Rio de Janeiro (1930–1960). *Rev. Bras. Estud. Urbanos Reg.* **2018**, *20*, 287–303. [CrossRef]
32. Abreu, M.D.A. *Evolução Urbana de Rio de Janeiro*, 4th ed.; Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos (IPP): Rio de Janeiro, Brazil, 2006.
33. Moraes, P. Relações espaciais como morfogênese do território da Avenida Brasil, no Rio de Janeiro. *EURE* **2022**, *48*, 1–23.
34. Andreatta, V.; Chiavari, M.P.; Rego, H. O Rio de Janeiro e a sua orla: História, projetos e identidade carioca. *Colec. Estud. Cariocas* **2009**, *201*, 1–16.
35. Thompson, G. Rio de Janeiro Galeão Airport—From Start to Finish. 29 January 2022. Available online: <https://www.youtube.com/watch?v=Wg4ebs-gXi0> (accessed on 10 October 2023).
36. Muehe, D.; Valentini, E. *O Litoral do Rio de Janeiro: Uma Caracterização Físico-Ambiental*; Volume Projeto PLANAGUA—SEMA/GTZ; Cooperação Técnica Brasil—Alemanha; Fundação de Estudos do Mar FEMAR: Rio de Janeiro, Brazil, 1998; p. 129.
37. da Rocha, P.L.F.; da Silva, G.C., Jr.; Polivanov, H.; Ribeiro, N.M.S., Jr.; Moraes, E.O.; Sobreira, G.V.A. Geoelectric survey of Fundão Island, Rio de Janeiro. In Proceedings of the Environmental and Engineering Geophysics, 4th Meeting, EEGS'98-European Section, Barcelona, Spain, 14–17 September 1998.
38. Amador, E.S. *Bacia da Baía de Guanabara: Características Geoambientais, Formação e Ecossistemas*; Interciência: Rio de Janeiro, Brazil, 2012; pp. 1–405.
39. de Oliveira, J.F.; Muehe, D. Identificação de áreas de sedimentos compatíveis na plataforma continental interna para recuperação de praias entre as cidades de Niterói e Macaé. *Rev. Gest. Costeira Integr.-J. Integr. Coast. Zone Manag.* **2013**, *13*, 89–99. [CrossRef]
40. Rogel, Y.Á.; García, C.C. Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España). *GeoFocus* **2018**, *21*, 101–118. [CrossRef]
41. Silva, L.C.D.; Silva, M.A.M.; Santos, C.L.D. Morfodinâmica e a estabilidade da praia de Piratininga, Niterói (RJ). *Rev. Bras. Geociênc.* **2009**, *39*, 685–694. [CrossRef]
42. Silva, L.C.D. Comportamento Morfológico e Sedimentológico do Litoral de Itaipuaçu (Maricá) e Piratininga (Niterói), RJ, nas últimas três décadas. Master's Dissertation, UFF, Niterói, Brazil, 2006.
43. Bastos. *Estudo da Variação Morfológica a partir de Parfis de Praia em Piratininga, Niterói-RJ, Brasil. Relatório final da Disciplina Estágio de Campo IV-D*; UFF: Rio de Janeiro, Brazil, 1994.
44. Muehe, D.C. *Análise Ambiental no Sistema Costeiro Sul-oriental do Estado do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. Pós Graduação em Geografia*; UFRJ: Rio de Janeiro, Brazil, 1975.
45. Neto, J.A.B.; Smith, B.; McAllister, J. Sedimentological evidence of human impact on a nearshore environment: Jurujuba Sound, Rio de Janeiro State, Brazil. *Appl. Geogr.* **1999**, *19*, 153–177. [CrossRef]
46. Smyth, G.; Royle, S.A. Urban landslide hazards: Incidence and causative factors in Niteroi, Rio de Janeiro State, Brazil. *Appl. Geogr.* **2000**, *20*, 95–117. [CrossRef]
47. Silva, M.A.M. Um estudo sobre a dinâmica das praias de Niterói (Baía de Guanabara, RJ). *An. Acad. Bras. Ciênc.* **1999**, *71*, 962–967.
48. da Costa, G.S. *Niterói, 19th Century: An Analysis of Its Historical Cartography*; Universitat Politècnica de Catalunya: Barcelona, Spain, 2022.
49. Pereira, R.C.D. Evolução Urbana Niterói: Da cidade colonial à cidade capitalista. *Eixo Temát.* **2021**, *16*, 1294–1311.
50. Fernandes, P.G.; Neto, J.A.B.; Vieira, K.S.; de Almeida, M.P.; Correa, T.R.; de Freitas Delgado, J.; da Fonseca, E.M. Multitemporal analysis by remote sensing of the evolution of coastal Line of Guanabara Bay. *S&G J.* **2020**, *15*, 59–69.
51. Verdonshot, P.; Spears, B.; Feld, C.; Brucet, S.; Keizer-Vlek, H.; Borja, A.; Elliot, M.; Kernan, M.; Johnson, R. A comparative review of recovery processes in rivers, lakes, estuarine and coastal waters. *Hydrobiologia* **2013**, *704*, 453–474. [CrossRef]
52. Moraes, L.E.S.; Gherardi, D.F.M.; Fonseca, L.M.G. Análise multi-temporal da cobertura vegetal do tipo manguezal da APA de Guapimirim (RJ) através do processamento de imagens TM-LANDSAT. In Proceedings of the XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brazil, 25–30 April 2009; pp. 4615–4622.
53. de Araújo, D.S.D. Mapeamentos dos manguezais do recôncavo da Baía de Guanabara através da utilização de técnicas de sensoriamento remoto. *Rev. Gest. Costeira Integr. J. Integr. Coast. Zone Manag.* **2010**, 1–9.
54. Godoy, M.; Moreira, I.; Bragança, M.; Wanderley, C.; Mendes, L. A study of Guanabara Bay sedimentation rates. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **1998**, *227*, 157–160. [CrossRef]
55. Barbosa, M.C.; de Almeida, M.D.S.S. Dredging and disposal of fine sediments in the state of Rio de Janeiro, Brazil. *J. Hazard. Mater.* **2001**, *85*, 15–38. [CrossRef] [PubMed]
56. Eichler, P.P.B.; Eichler, B.B.; Pimenta, F.M.; Pereira, E.R.M.; Vital, H. Evaluation of Environmental and Ecological Effects Due to the Accident in an Oil Pipe from Petrobras in Guanabara Bay. *Open J. Mar. Sci.* **2014**, *4*, 298–315. [CrossRef]
57. Pérez, R. *Burle Marx y su Intervención en el Paisaje Cultural de Copacabana. Documentación, Análisis y Protección de un Patrimonio Contemporáneo*. Ph.D. Thesis, Universidad de Sevilla, Sevilla, Spain, 2012.
58. Toste, R.; Vasconcelos, A.; Assad, L.P.D.F.; Landau, L. Dynamically downscaled coastal flooding in Brazil's Guanabara Bay under a future climate change scenario. *Nat. Hazards* **2024**, *120*, 7845–7869. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Artículo nº3

**Comparing the Effects of Erosion and Accretion
along the Coast of Pontchartrain Lake and New
Orleans in EE.UU.**

Nota:

Artículo en proceso de revisión para publicación en revista científica indexada

Comparing the Effects of Erosion and Accretion along the Coast of Pontchartrain Lake and New Orleans in EE.UU.

Silvia V. González Rodríguez ^{1*}, Vicente Negro Valdecantos ¹, José M. del Campo ¹, and Vanessa Torrodero Numpaque²

¹ Marine, Coastal and Port Environment and other Sensitive Areas Research Group. Department of Civil Engineering: Hydraulics, Energy and Environment. Universidad Politécnica de Madrid. 28040 Madrid, Spain; silviaviviana.gonzalez.rodriguez@alumnos.upm.es; vicente.negro@upm.es (V.N.); josemaria.delcampo@upm.es (J.M.d.C.)

² Universidad Politécnica de Madrid. 28040 Madrid, España

* Correspondence: silviaviviana.gonzalez.rodriguez@alumnos.upm.es

Abstract: This research examines the transformation of the coastal landscape of Pontchartrain Lake, including the New Orleans coastline. A paper addresses the critical need to understand long-term environmental changes through a comprehensive geospatial analysis of historical cartographic representations. By comparing the United States Coast Survey Sketch (1846-1852) with Google Earth aerial photographs of 2023, the study employs a rigorous methodology involving three key stages: (1) georeferencing maps using QGIS, (2) vectorization through AutoCAD, and (3) comparative spatial analysis to quantify coastal morphological changes. The quantitative findings reveal significant coastal dynamics, with Lake Pontchartrain experiencing a total balance of erosion of -36.42 km², although the New Orleans coastal zone has undergone land reclamation. The research offers a critical historical analysis of the evolution of coastal landscapes in response to anthropogenic influences. However, that the methodology is constrained in to address the socioeconomic impacts. Nevertheless, the study considered the profound environmental and societal consequences of historical governmental and social decisions, thereby underscoring the intricate interplay between natural processes and human intervention in coastal ecosystems. These findings contribute to a more profound comprehension of the processes of coastal landscape transformation, underscoring the dynamic and fragile nature of coastal environments.

Keywords: Pontchartrain Lake; New Orleans; Littoral; Coastline; Colonial Cartography; Aerial Photography; Accretion; Erosion.

Citation: To be added by editorial staff during production.

Academic Editor: Firstname Last-name

Received: date

Revised: date

Accepted: date

Published: date



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Coastal dynamics represent a complex interplay of geological, climatic, and anthropogenic processes that continuously reshape the interface between terrestrial and marine environments. The morphological evolution of coastal systems is the result of complex interactions between geomorphological characteristics, climatic regimes, ecological protective mechanisms, and human interventions. Particle mobilization and sedimentary transport represent fundamental mechanisms through which coastal landscapes undergo transformation, enabling the displacement of material from source regions to depositional zones. These mechanisms operate across a range of temporal scales, from immediate meteorological events such as storm surges and wave dynamics to long-term geological phenomena such as tectonic movements and glacial cycles [1]. The resulting geomorphological modifications are manifested through erosional and accretional processes, which systematically alter coastal topography. The redistribution of sedimentary materials not only reflects the inherent dynamism of coastal systems but also serves as a critical indicator of environmental change, revealing the complex interactions between lithospheric,

hydrospheric, and atmospheric components. An understanding of these intricate processes provides crucial insights into the resilience, vulnerability, and potential future transformations of coastal systems in the context of changing environmental conditions [2].

Consequently, the majority of coastlines are naturally dynamic, meaning they are perpetually engaged in an ongoing environmental dialectic. This dialectic is defined by a dynamic interaction between the ocean (water) and the continent (defined by its morphology). In this interaction, the ocean exerts an impact on the continent that receives it, modifying the continent's morphology in the process (either through erosion or accretion). The receding water transports material from the continent, which it will subsequently act upon at the coastline, thereby perpetuating an endless dialectic in the littoral zone. The environmental dialectic depends directly on the nature and initial morphology of the coastal zones and their borders. For its effects are important to distinguish between structural and sedimentary coasts; the former being cliffs, reefs, and flats, while the second category consists of beaches of different shapes depending on the previous structural morphology [3].

The objective of the research is to analyse the coastal transformation of Lake Pontchartrain, including New Orleans city, with a particular focus on the quantitative assessment of anthropogenic landscape modifications. The study aims to evaluate landscape changes through chronological erosion and accretion measurements, categorizing spatial-temporal variations induced by human intervention. By employing geospatial analysis and historical analysis, the research will document the extent of landscape alterations, assess impact, and provide data on coastal ecosystem transformation mechanisms. This case study is part of a larger investigation with a primary goal of generating awareness for landscape reconstruction and sustainable coastal management strategies.

Perception of the physical environment

Building upon previous research by the investigative group, a four-phase conceptual framework is proposed for comprehending and transforming ecosystem perception into territorial configuration: submission, adaptation, conquest, and respect. These phases, as defined by González et al. [3], represent a systematic approach to understanding the transition from an undifferentiated "site" to a meaningful "place" through progressive human-ecosystem interaction.

Submission phase: humans fear nature, and cities are built away from the sea's shoreline to be protected from storms and rough weather, whilst also watching out for pirates and preventing invasions.

Adaptation phase: after humans become sedentary by observing nature, modifying its customs, and natural resources are optimized and begin to coexist within the framework of the city.

Conquest phase: humanity has knowledge, training, tools, and technology at its disposal to overcome obstacles imposed by the environment and takes over the territory. In some cases, leads to the disappearance of plant and animal species

Respect phase: implies greater awareness for a life in equilibrium with the environment, where engineering must be managed based on environmental sensitivity and social equity.

This research contributes to a larger investigation exploring the correlation between the four phases of physical environment perception and the corresponding landscape states. In order to elucidate this relationship, it is essential to define the four landscape states: original, constructed, destroyed, and reconstructed. The definitions employed in this study are derived from Martin-Anton [4] and González et al [5] conceptual framework, which was specifically developed within the context of littoral landscape dynamics.

Original Landscape: The concept is to defend exceptional places within an objective concept and dimension. It responds to the concept of “protected” in certain bibliographic sources. 98
99
100

Constructed landscape: The concept combines nature and construction works, illustrating the evolution of the natural environment as a social and cultural force. It responds to the concept of “cultural” in certain bibliographic sources. 101
102
103

Destructed landscape: “Abandoned”. This consists of the disappearance of the natural and territorial area of the city and nature in all its aspects from social to environmental, from sustainable to communications. 104
105
106

Re-constructed landscape: It consists of rehabilitating, dismantling, returning the “place” to its exceptional and objective scenario and horizon, “reconquered”. 107
108
109

In the context of this research, two fundamental coastal transformation processes are defined: erosion and accretion. The phenomenon of coastal erosion is conceptualized as a consequence of the interaction between human-induced activities and natural environmental changes, whereby the equilibrium of coastal dynamics (waves, currents, wind) is disrupted. The long-term loss of sediments of coastal zone results in the destruction process of the coastline retreat and beach erosion [6]. This process is characterized by two critical conditions: the intensity of current flow capable of mobilizing basal sediments and the imbalance between sediment supply and disappearance [7]. Accretion, in contrast, represents the accumulation of sediments in specific coastal locations, resulting in modifications to the shoreline through natural deposition or anthropogenic intervention. Accretion mechanisms include direct sand deposition to increase beach width and the construction of infrastructure such as ports or artificial islands. Studies by Martín et al. [8] indicate that land reclamation through artificial islands is significantly more extensive in regions such as China, Japan, Korea, and the Persian Gulf, with greater relevance in port zones than residential areas. 110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124

Study Area 125

Pontchartrain Lake, a brackish water body situated in southeastern Louisiana, represents the second-largest saline lake in the United States and the most extensive lacustrine system within Louisiana’s territorial boundaries. The lake is characterized by an ovoid morphological configuration, with a span of 64.4 kilometers from east to west and 38.6 kilometers from north to south. Its southern shoreline delineates the northern boundary of **New Orleans**, while its northern littoral zone encompasses the municipalities of Mandeville and Madisonville. The northeastern sector is demarcated by the urban settlement of Slidell. From a hydrological perspective, the lake is part of a complex interconnected system. It is linked to Lake Maurepas to the west via the Manchac Pass and to Lake Borgne in the east via the Rigoletto Strait. The latter subsequently interfaces with the Gulf of Mexico, creating a dynamic estuarine network that is characteristic of the Louisiana coastal ecosystem. 126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137

New Orleans is situated in the Mississippi River Delta, approximately 29.9511° N and 90.0715° W (Figure 1). It is positioned at the confluence of the Mississippi River and Lake Pontchartrain, approximately 177 km (110 miles) from the Gulf of Mexico. The city’s geographical location renders it highly susceptible to frequent hurricanes and storms, with predominant wind vectors originating from the southeast. The occurrence of extreme wind gusts during the hurricane season (June to November) has a significant impact on wave dynamics, with the potential to generate considerable wave heights that contribute to the processes of coastal erosion and flooding. The urban infrastructure is constructed on a series of ancient deltaic channels and lobes, forming a relatively flat and low-lying terrain with elevations ranging between 0 and 6 meters above sea level [9]. However, more recent investigations by Dixon et al. [10] indicate that New Orleans experienced rapid subsidence in the three years preceding Hurricane Katrina (August 2005). The eastern 138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149

sector of the city historically presents the highest subsidence rates in southern Louisiana, featuring a topography 3 to 5 meters below sea level.

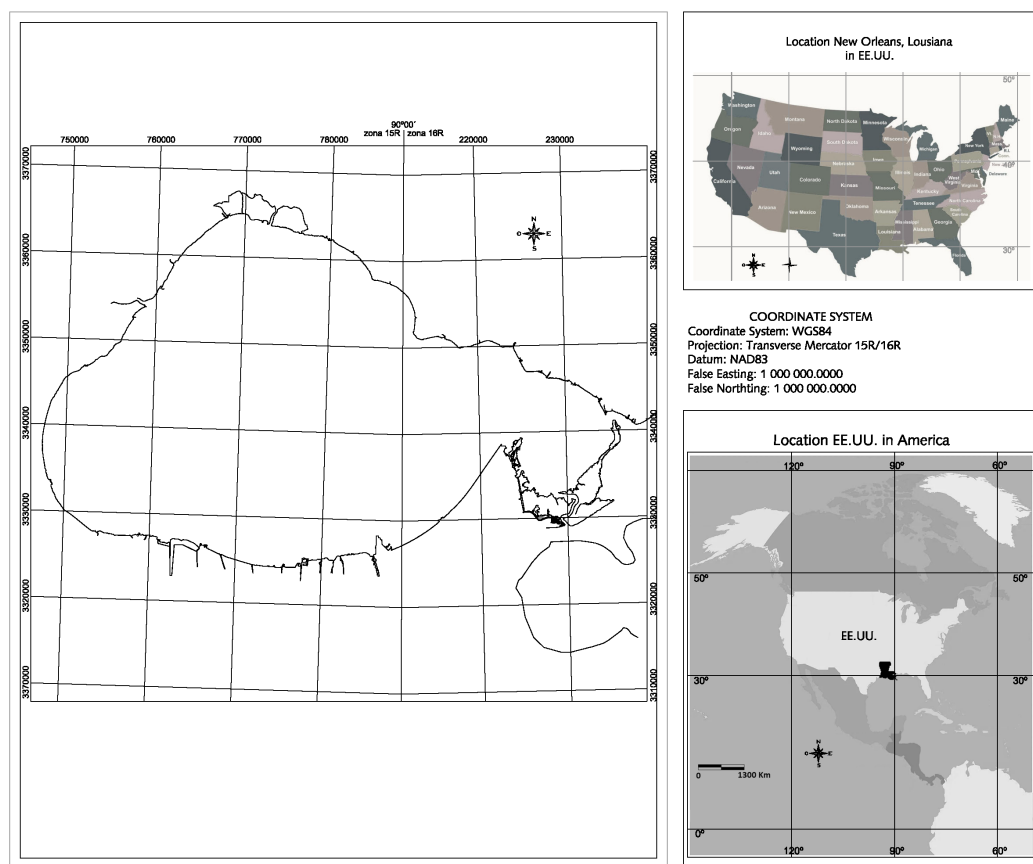


Figure 1. Georeferenced location (plane coordinates) of the Pontchartrain Lake in Louisiana, EE.UU. EE.UU. is located in North America at the bottom right (geographic coordinates). Use coordinate system WGS84, Datum NAD83.

According to Törnqvist et al. [11], the confluence of topographical characteristics—specifically the region's low-altitude configuration—and its geographical positioning render New Orleans exceptionally susceptible to climate change impacts and sea-level rise, presenting complex environmental management challenges that necessitate comprehensive adaptive strategies for mitigating potential ecological and infrastructural vulnerabilities.

This work was developed on a littoral area formed by the Pontchartrain Lake (Figure 1), which is situated in the Caribbean Sea and extends from the north coast of New Orleans City to the coast of Irish Bayou.

The paleogeographic evolution of the study area provides insight into the formation of the Mississippi Delta over geological time. In their 2009 study, Flocks et al. [12] describe Lake Pontchartrain as a shallow barrier estuary with a recent geological evolution dating to the Pleistocene. This evolution is marked by the formation of multiple glacial cycle terrace formations. Approximately 18,000 years ago, when sea levels were significantly lower, fluvial erosion of the terraces occurred, resulting in the transportation of sediments to the continental shelf margin. Approximately 4,000 years ago, the progradation of the St. Bernard delta along the southern basin margin resulted in the enclosure of the bay and the formation of Lake Pontchartrain in its current configuration. In addition, Van Asselen et al. [13] provide further insight by indicating that approximately 5,000 years ago, the delta's deposition center was situated to the west of the modern delta. Approximately

3,800 years ago, a significant avulsion of the Mississippi River created a new course that enclosed the ancient bay, forming Lake Pontchartrain. Subsequently, approximately 2,500 years ago, the Metairie-Gentilly distributary channel was activated, contributing fluvio-deltaic sediments to the region and ultimately establishing the Mississippi River's current course around 1,000 years ago. This paleogeographic evolutionary process generated a variety of sedimentary environments, including distributary channels, cypress swamps, and sand barriers. As a result, New Orleans was situated upon a sedimentary bed that was primarily composed of clay, silt, and sand.

A comprehensive study conducted by the U.S. Army Corps of Engineers [14] reveals that the salinity of the Lake Pontchartrain estuary fluctuates between 0.5 and 15 parts per thousand. Historically, submerged aquatic vegetation (SAV) proliferated extensively along the lake's shorelines. However, anthropogenic shoreline modifications, increased water turbidity, and excessive algal growth precipitated a dramatic decline in total SAV coverage, with an approximate 90% reduction between 1954 and 1998. Although the La Niña phenomenon between 1998 and 2001 temporarily restored submerged aquatic vegetation (SAV) densities to 80% of the 1953 baseline, subsequent ecological disruptions, including drought conditions and the destructive impacts of Hurricane Katrina and subsequent hurricanes between 2005 and 2012, caused extensive SAV degradation. By 2016, submerged aquatic vegetation (SAV) coverage had diminished to approximately 10% of its 1953 historical extent, indicating a significant ecological transformation in the Lake Pontchartrain ecosystem.

The hydrodynamic circulation within Lake Pontchartrain is subject to a complex interaction of wind-generated waves, freshwater inflows and tidal fluctuations. Wind-induced bottom currents exceeding 10 cm/s have been observed, resulting in the generation of suspended sediment concentrations in excess of 100 mg/L. The predominant direction of water movement is from west to east, with the lake's waters flowing towards the Mississippi Sound during flood events. Additionally, variations in sea level through narrow passes induce intense tidal currents in the eastern sector of the lake. This circulation system generates a distinctive two-gyre pattern centred within the lake, characterized by robust currents along the shorelines and attenuated flows in the central region. The intricate hydrodynamic configuration facilitates the resuspension of sediment during high-energy events, which consequently escalates water turbidity [15]. The intricate interplay of these hydrological mechanisms serves to illustrate the dynamic nature of the ecological and sedimentary processes occurring within Lake Pontchartrain.

The study area exhibits a humid subtropical climate characterized by tropical air masses dominating meteorological conditions during spring and summer, with continental cold fronts inducing substantial temperature variations throughout autumn and winter. Climatic dynamics are significantly modulated by extensive aquatic surfaces, including lakes, streams, and the Gulf of Mexico. Precipitation patterns demonstrate two well-defined rainy periods: summer precipitation (June-September) and intense winter rainfall (December-March), with an average of 119 precipitation days annually. Temperature regime reveals a mean annual temperature of 69.7°F (21°C), encompassing average maximum temperatures of 77.1°F (25°C) and minimum temperatures of 62.3°F (17°C), as documented by the U.S. Army Corps of Engineers [14]. This climatic configuration reflects the complex interplay between regional geographical features and atmospheric circulation patterns characteristic of the Gulf Coast region.

Vegetation in New Orleans and Lake Pontchartrain includes diverse ecosystems such as marshlands, swamps, and bald cypress forests. These ecological zones serve as vital wildlife habitats and function as natural flood mitigation buffers. The progressive alteration of the region's hydrology and subsidence dynamics can be attributed to temporal urban development. In the initial decade of the nineteenth century, the majority of New Orleans was covered by cypress swamps. In the subsequent decades, extensive

logging of cypress trees and the construction of canals for the transportation of timber led to the drainage of groundwater and the intrusion of saltwater. Between the years 1891 and 1939, the cypress swamps had nearly disappeared, with the initial indications of subsidence becoming apparent. By 1979, the majority of the area had undergone comprehensive urbanization, which fundamentally transformed the landscape's ecological and geomorphological characteristics [13]. This anthropogenic landscape modification represents a significant ecological transition, demonstrating the profound impact of human intervention on natural ecosystems.

Historical analysis of the evolution of the littoral landscape in the study area.

New Orleans, established in 1718, evolved into a pivotal location at the convergence of the Mississippi River and the Caribbean Sea. It has undergone numerous territorial transformations, from its initial incorporation into the Viceroyalty of New France to its eventual incorporation into the United States in 1803 [16] [17]. Given that approximately 60% of the urban area is situated below sea level, with elevations reaching as low as -1.4 m MSL [13], it is unsurprising that the city has historically developed intricate drainage and hydraulic infrastructure systems. The construction of a comprehensive drainage system between 1900 and 1920 precipitated a real estate boom that expanded the urban surface area by 700%. This transformation involved the conversion of ancient cypress swamps into residential zones [18]. Similarly, the city's drainage system has undergone significant modifications over time. Figure 2 illustrates the design elevations of the flood protection system across the New Orleans region, as outlined by Seed et al [19].

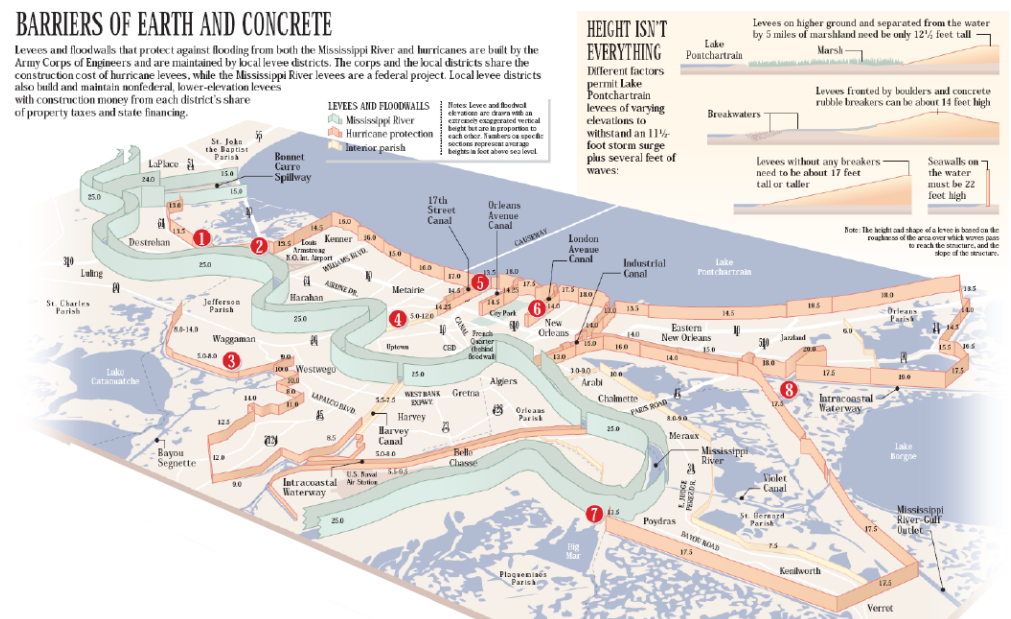


Figure 2. Design Elevations of the Flood Protection System Across the New Orleans Region.

Source: [19].

The urban development of the area was marked by a series of engineering interventions aimed at mitigating the risk of flooding. These included the excavation of approximately 58 km of drainage channels between 1833 and 1878. The port subsequently consolidated itself as a crucial commercial center, experiencing exponential growth after the completion of the levees in 1879 [20]. The city has served as a cultural crucible, with French, Spanish, African, and American influences melding to generate innovations such as the birth of jazz and to confront racial segregation challenges.

The pivotal moment in New Orleans' contemporary history occurred with the arrival of Hurricane Katrina in 2005. This event brought to light shortcomings in the levee system and illuminated the existence of significant social inequalities. In the aftermath of the disaster, over \$14.6 billion was invested in infrastructure improvements, resulting in the establishment of the Southeast Louisiana Flood Protection Authority to oversee protection projects [14]. The city has continued its reconstruction process, implementing strategies to address the challenges posed by its complex geography and to enhance resilience against climate change and natural threats.

The evolution of the coastal landscape in the study area is characterized by historical development. Table 1 below illustrates the significant interventions and projects aimed at restoring and reclaiming land through wetland creation and restoration, utilizing techniques such as artificial island construction and native vegetation replantation in New Orleans City. This compilation of major works executed throughout New Orleans' history is based on Campanella (2012) and subsequent research.

Table 1. Chronology of anthropogenic actions on the coast.

Year	Action
1825-1830	Louisville and Portland Canal Construction
1830s	Construction of the Pontchartrain and New Basin Canal to give the city access to the lake
1835	Construction of the New Orleans and Carrollton Railroad.
1840s	Excavation of the Destrehan Canal to connect the Mississippi River with Bayou Barataria
1860s-	Construction of railroads connecting the city with Biloxi, Mobile, Pensacola, and other
1875-1879	Construction of parallel breakwaters in South Pass to deepen the channel and allow ocean-
1896-1915	Installation of a drainage system to eliminate runoff and groundwater.
1935	Construction of the Huey P. Long Bridge to connect New Orleans with the east bank of the
1935-1950	Expansion of the Port of New Orleans and construction of new docks and terminals.
1946	Construction of Louis Armstrong International Airport
1956	Inauguration of the original Causeway
1975	Construction of the Superdome, one of the largest indoor venues in the world.
1965	Reconstruction and improvements to the levee and pump system after Hurricane Betsy.
1969	Inauguration of the Causeway expansion (parallel bridge to the original)
2005	Reconstruction and improvements to the flood protection system after Hurricane Katrina.
2004-2019	Expansion and modernization of Louis Armstrong International Airport.
2015	Construction of new parks and public spaces, such as Lafitte Greenway Park.

The northern coast of Jefferson Parish has undergone a substantial infrastructural transformation since the early 20th century. The initial interventions included the strategic construction of piers in Bucktown and Bonnabel, which facilitated maritime transportation. In the 1930s, dredging projects were implemented with the objective of improving the navigability of Lake Pontchartrain. A significant achievement was the construction of the Lake Pontchartrain Causeway in the 1950s, an extensive 38-kilometer infrastructure project. Subsequent decades were marked by coastal restoration initiatives, including the construction of breakwaters and the rehabilitation of wetlands. In the 21st century, efforts have been directed towards infrastructure renovation and the development of recreational facilities, reflecting a sustained commitment to the continuous evolution of coastal landscape management [21].

The Lake Pontchartrain Causeway represents a critical infrastructural engineering achievement, spanning approximately 50 kilometers and connecting New Orleans and Covington. Comprising two parallel bridges, the structure extends 38 kilometers directly over Lake Pontchartrain, establishing it as the world's longest continuous water-spanning bridge. Engineered with precise hydrological considerations, the bridge features a

consistent vertical clearance of 4.90 meters, strategically incorporating two navigational lift spans of 7.60 meters to accommodate maritime traffic. Originally conceptualized in 1920 as a proposal for artificial island interconnection financed through land sales, the project materialized under the leadership of James E. Walters, who was appointed to a dedicated commission in 1948. The initial two-lane bridge was inaugurated in 1956, with a complementary parallel structure, 15 meters longer, commissioned in 1969, enhancing regional transportation infrastructure [22]. The bridge construction necessitated the development of a comprehensive 40-acre assembly facility strategically positioned on the northern shoreline of Lake Pontchartrain. The infrastructure engineering project required the precise excavation of a navigational canal, meticulously dimensioned at 366 meters in length, 4.57 meters in width, and 3.66 meters in depth. This engineered waterway was specifically designed to facilitate systematic maritime logistics, enabling specialized barges to efficiently transport prefabricated structural components (including steel pile foundations, load-bearing girders, and modular deck sections) from the manufacturing plant directly to the bridge construction site. The canal's geometric specifications were optimized to ensure seamless material transportation and minimize logistical constraints during the complex infrastructure development process [23].

The Lake Pontchartrain Causeway expansion project, overseen by Boh Bros., incorporated cutting-edge infrastructure design elements, including low-gradient ramps and meticulously planned toll platforms. The project employed the Construction Manager at Risk (CMAR) methodology, which entailed the incorporation of twelve safety shoulder segments along the existing bridge. Prefabricated components were constructed in a controlled environment and subsequently transported by maritime vessels, thereby avoiding any disruption to the surrounding traffic. The innovative construction approach, validated by the American Society of Civil Engineers [24], involved coastal dredging and landfill operations, enabling the project to be completed in less than nine months [25]. Figures 3 and 4 illustrate the bridge starters at both termini of the Lake Pontchartrain Causeway. They depict the South Lake Pontchartrain Causeway Toll Plaza in Metairie (Figure 3) and the North Lake Pontchartrain Causeway Terminus in Mandeville (Figure 4). These illustrate the critical continental land connections that they establish.



Figure 3. South Lake Pontchartrain Causeway Toll Plaza, Metairie. Source: Historic American Engineering Survey photo via Library of Congress website at <https://www.loc.gov/re-source/hhh.la0640.photos/?sp=2&st=image>



Figure 4. North Lake Pontchartrain Causeway Terminus, Mandeville. Source: <https://www.youtube.com/watch?v=Lm0ZyeCEoOM>

The Maurepas Swamp Wildlife Management Area, spanning approximately 28,300 hectares across St. Charles and St. John Baptist Parishes, represents a critical freshwater wetland ecosystem. Characterized by the Wetland Watchers Park and the 16-km Maurepas Wildlife Trail, the area serves as a pivotal site for environmental education and conservation [26]. Historical landscape transformation began with French explorers Pierre Le Moyne d'Iberville and Jean-Baptiste Le Moyne de Bienville, who extensively mapped the region in the late 17th and early 18th centuries. The establishment of Fort Maurepas in 1699 marked the initial colonial infrastructure development, accompanied by canal networks facilitating fluvial transportation and resource extraction [27]; [28]. Successive colonial administrations (French, Spanish, and American) progressively modified the wetland ecosystem. Spanish interventions included infrastructure development through the San Bernardo Mission (1779), while American acquisition in 1803 intensified natural resource exploitation and transportation infrastructure construction [29]. Throughout the 20th century, anthropogenic interventions significantly impacted the Maurepas Swamp's ecological integrity. Critical infrastructure projects—including the Intracoastal Waterway, Bayou Manchac, and Interstate 10—fragmented the wetland ecosystem, disrupting natural hydrological processes and habitat connectivity [30]. These cumulative interventions have progressively degraded the Maurepas Swamp's ecological structure, emerging from resource extraction, habitat fragmentation, urban expansion, and sediment flow alterations. Such pressures have compromised the ecosystem's interface with Lake Pontchartrain, reducing overall ecological resilience [31]. Contemporary conservation efforts, exemplified by the Wetland Watchers Park and Wildlife Management Area, aim to mitigate historical ecological disruptions and preserve this critical wetland ecosystem.

The Manchac Wildlife Management Area (MWMA), which encompasses 12,140 hectares in Tangipahoa Parish, is overseen by the Louisiana Department of Wildlife and Fisheries (LDWF). The area, which encompasses freshwater wetlands, marshlands, and cypress forests, serves as a vital ecological reserve. The research conducted by Visser et al. [32] underscores the area's rich biodiversity while also identifying several significant challenges, including habitat degradation, the proliferation of invasive species, and the impact of climate change. In order to maintain the ecosystem's ecological integrity and preserve its natural resources, it is necessary to implement adaptive management strategies in response to the environmental pressures that are currently being experienced [33].

St. Tammany Parish, situated adjacent to the Tchefuncte River and encompassing both St. Tammany Refuge and Big Branch Marsh National Wildlife Refuge, serves as a

prime example of intricate coastal ecosystem deterioration. The region has historically been characterized by extensive marshlands, but has undergone significant urban and suburban expansion in recent decades, resulting in substantial ecological disruption. Notwithstanding the enactment of environmental regulations such as the Clean Water Act (Section 404, 1972) and the Rivers and Harbors Act (1899), a considerable number of permits have been issued for the destruction of wetlands that were not strictly necessary. The construction of urbanization projects, including developments such as Three Rivers Estates, Piney Woods, and Audubon Lake, has resulted in the systematic compromise of natural landscapes, with notable instances of wetland conversion. Specific environmental challenges include the illegal abandonment of vessels, particularly oil tanker barges used for the disposal of hazardous waste, and the unauthorized modification of wetlands. The preliminary construction works, situated in close proximity to DePaul Northshore Hospital, have resulted in the destruction of approximately 0.6 km² of wetland area, thereby further compromising the region's ecological integrity [34]. The towns of Lewisburg and Mandeville are situated within this region.

The southernmost extent of Irish Bayou is situated at the conclusion of the study area, as well as within the confines of the Parish of Orleans. In this area is located La Eden Isle, an upscale residential community with access to the lake and surrounding natural areas. This community was developed in the late 1960s and has subsequently expanded, becoming a major tourist destination. Additionally, the state's Chef Menteur Highway (Route 90), which was originally constructed to connect New Orleans to coastal communities and ports along the Gulf of Mexico, now serves as a crucial route for accessing the St. Tammany Refuge and other natural areas in the region. The zone and study area conclude at the Bayou Sauvage Urban National Wildlife Refuge (Bayou Sauvage Urban National Wildlife Refuge), which encompasses a 93 km² area of freshwater and brackish marshes situated within the New Orleans city limits. This refuge is the largest urban wildlife refuge in the United States [35].

2. Materials and Methods

The methodology employed is identical to that utilized by this research group in previous case studies conducted as part of a larger investigation. The methodology entails comparing two plans of the study area in order to demonstrate the alterations to the coastline and to evaluate and quantify the area situated between the two historical coastlines subjected to analysis. The case study is analyzed with reference to the map in figure 5, which corresponds to the survey in Section No. 8 from 1846 to 1852 (Sketch H). This map is taken from the 1853 edition of the Report of the Superintendent of the U.S. Coast Survey. The current coastline, figure 6, was generated through the photogrammetric processing of aerial images captured through the Google Earth platform, corresponding to the year 2023. These images encompass Lake Pontchartrain and the city of New Orleans.

In order to georeference the study area, the vertical coordinate information is referenced to the North American Datum 1983 (NAD 83) through the Transverse Mercator projection 15R/16R. These geodetic reference and graphic coordinate systems are based on the ellipsoid of the Geodetic Reference System, designated "World Geodetic System 1984" (WGS84).

Following vectorization, it was necessary to make a scale adjustment of the coastline obtained from the 1853 plan with a factor of 1.15 to ensure a splice that would allow comparison with the coastline obtained from Google Earth aerial photographs taken in 2023.

The accuracy and precision of the georeferencing are contingent upon the characteristics of the control points, which must therefore be carefully selected and appropriately characterized. In order for a control point to be suitable for georeferencing, it must satisfy the following conditions: (i) It must be "unequivocal" and clearly identifiable in the documents to be georeferenced, (ii) it must belong to accurately represented elements, (iii) it

must correspond to elements that are considered "invariable" over time, and (iv) it must present a homogeneous and uniform distribution over the entire surface of the area to be [36].

The maps were vectorized using AutoCAD 2013, a computer-aided design software program designed for two-dimensional drawing. The maps were vectorized using AutoCAD 2013, a computer-aided design software program designed for 2D drawing. The georeferenced plan was exported from QGIS to AutoCAD, whereby the geographic coordinates were converted into plane coordinates. The vectorization process was conducted with precision, ensuring that the vectors were captured at the same scale as the original plan. The capture of the vector spatial object was of a polygonal geometry type and was performed by adjusting the definition points of the vector entities to the raster (image) manually. During this process, the zoom tool was utilized to mark points with greater precision. All figures contain graphic scales.

The vector precision, which is based on digitized plans, considers the minimum detail present on a plan to be $0.2 \text{ mm} \times E$, where E is the denominator of the plan scale. The constant 0.2 mm corresponds to the minimum separation discerned by the human eye on average, which means that the maximum potential error is 0.4 m . Each of the vectorized coastlines was assigned specific attributes incorporated into the calculations; negative values correspond to erosion, while positive values correspond to accretion.

Once the maps had been overlaid, the areas where significant alterations to the coastline had occurred were identified. In order to facilitate a detailed observation of the evolution of the coastline in the aforementioned areas, a third coastline was created using data from an intermediate year. Subsequently, the variations in the coastline were quantified, thereby enabling the calculation of the area of change between coastlines. The estimated error was less than 5%, a value that correlates with the errors obtained in previous investigations conducted by our research group.

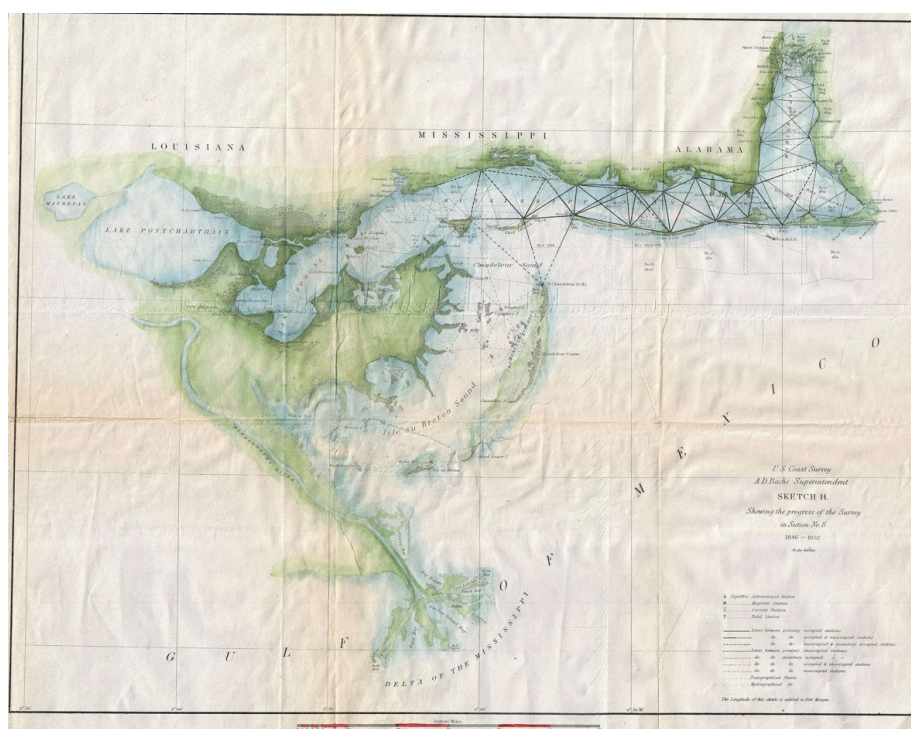


Figure 5. Sketch H. Showing the progress of the Survey in Section No. 8 1846 - 1852. Source: United States Coast Survey. Wikimedia Commons. <https://w.wiki/BFVC>

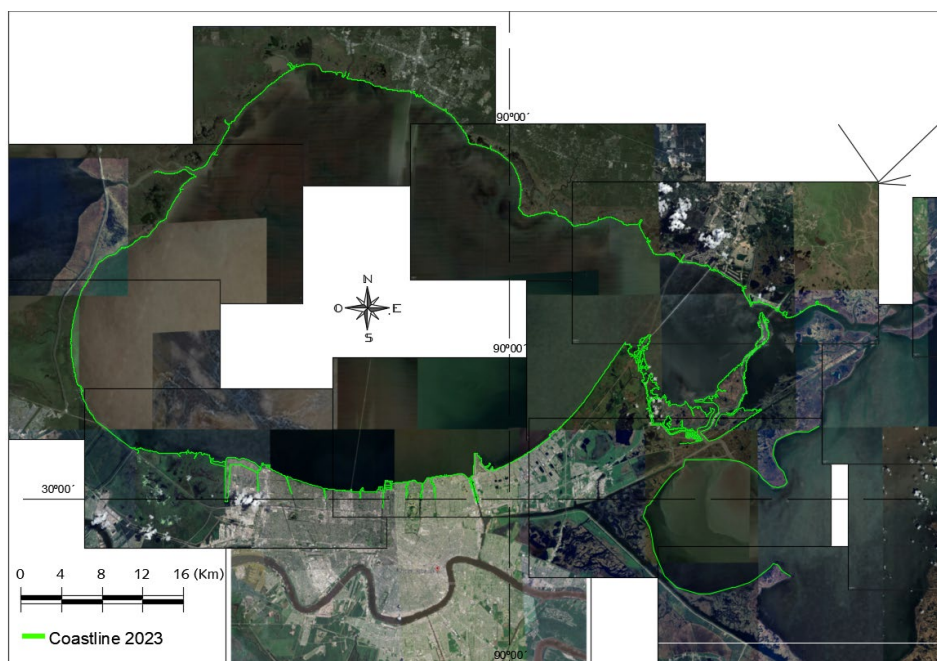


Figure 6. 2023 aerial photographs. Ten sites (framed) that correspond with the important places analyzed in this paper. Source: own elaboration, taken from Google Earth.

3. Results

Once the base coastlines were obtained, from the colonial period (1853 map) and the one obtained from Google Earth (2023) after performing the overlay, it was observed that it is not possible to make them fit as continuous lines, so the coastline obtained in 2023 was left as a template, while the coastline obtained from the 1853 map was scaled with a factor of 1.15 and divided into 3 parts to fit the lines more adequately and perform the analysis. Figure 7 shows the overlay that best fitted the two vectorized lines. Table 2 presents the areas of accretion or erosion observed in each section, along with the final quantification. As evidenced by the observations, the study area exhibits erosion affecting an area of 36.42 km².

Table 2. Accretion and erosion areas in each study zone. Source: Own compilation.

No.	Zone / Segment	Accretion	Erosion	Balance
I	New Orleans Lakefront Airport	7,88		7,88
II	University of New Orleans			
III	Bayou St. John Channel			
IV	Orleans Channel	16,15		16,15
V	17th Street Channel			
VI	Bonnabel Channel			
VII	Causeway (south bridge starter)			
VIII	Lakefront Trail at Clearview Blvd		-3,15	-3,15
IX	Laketown	0,19		0,19
X	Wetland Watchers Park		-19,18	-19,18
XI	Gary Rd	1,23		1,23
XII	Manchac Wildlife Management Area		-35,31	-35,31
XIII	Tchefuncte River Outfall	-	-	-
XIV	Mandeville	7,82		7,82
XV	St. Tammany Refuge		-4,63	-4,63
XVI	Big Branch Marsh National Wildlife Refuge	5,43		5,43
XVII	Irish Bayou		-12,85	-12,85
Total		38,7	-75,12	-36,42

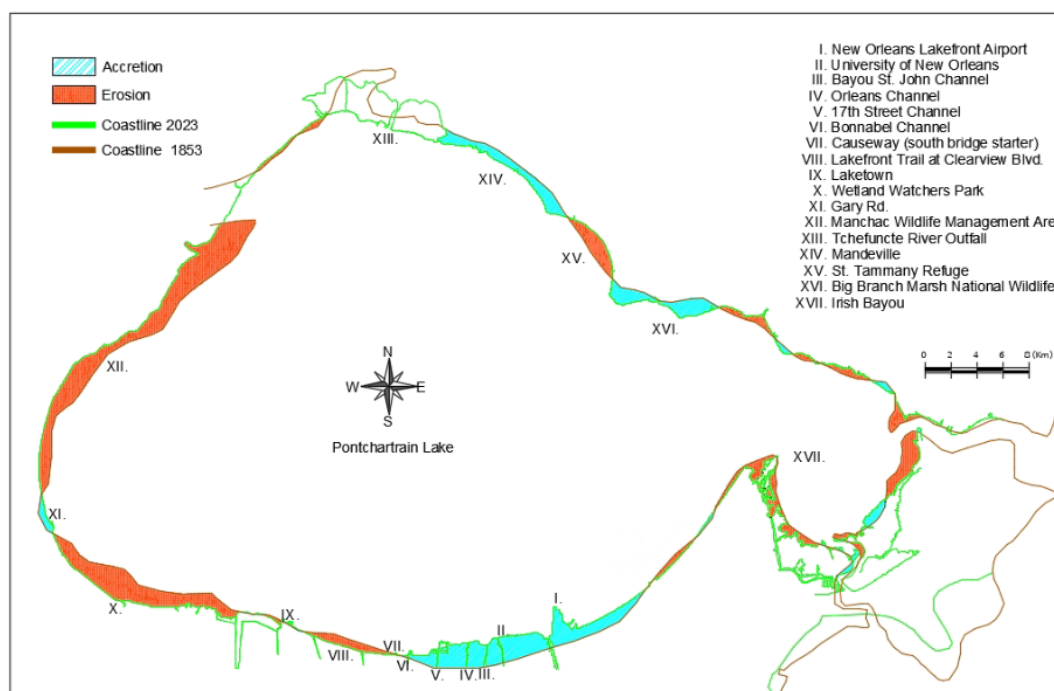


Figure 7. Coastline superimposition of the vectorized cartographic plans of 1853 and 2023. Source: own elaboration.

The study was conducted in a clockwise direction, beginning with the coast of New Orleans and subsequently traversing the interior of Pontchartrain Lake. The analysis encompassed a comprehensive examination of the shorelines. The study concluded with an analysis of the coastal area of Irish Bayou, located in the eastern end of Orleans Parish. The following section will present a detailed account of the results obtained for each zone.

The coastal zones I to VII, evidencing 24.03 km² of land reclamation from the lake, correspond to the New Orleans coastline and primarily comprise critical infrastructural developments: I. New Orleans Lakefront Airport, II. University of New Orleans, III. Bayou St. John Mouth, IV. Orleans Channel Mouth, V. 17th Street Channel Mouth, VI. Bonnabel Channel Mouth, and VII. Causeway (Southern Bridge Terminus). These structures have been progressively modified to function as adaptive protective infrastructures capable of mitigating storm surge, hurricane impacts, and sea-level rise. The Lakefront Airport (Zone I) was constructed through hydraulic fill techniques to elevate terrain above sea level. Zones II to VII, encompassing various canal and natural waterway mouths transporting water from the city's interior to the lake, have been integral to comprehensive drainage and flood containment strategies, involving reinforcement, landfill, and morphological modifications to ensure robust urban protection. These interventions represent a critical approach to urban resilience and coastal management in a dynamic environmental context.

Zones VIII to XII have demonstrated a significant erosion of 57.64 km², representing over 75% of the total study area erosion. The Maurepas Swamp region has experienced substantial surface area loss in recent decades, driven by complex, interconnected environmental and anthropogenic factors. Soil subsidence, caused by drainage, groundwater extraction, and compaction, has progressively transformed wetlands into open water bodies, while accelerated sea-level rise in the Gulf of Mexico has systematically inundated coastal ecosystems. Catastrophic hurricanes such as Katrina and Rita have inflicted severe damage through cyclonic storm surges and high-velocity winds, causing extensive vegetation destruction. Concurrent human activities, including infrastructure construction, pollution, and urban development, have further fragmented and degraded these critical ecological systems. The synergistic interaction of these natural and anthropogenic

processes has resulted in a concerning and accelerated surface area reduction of the Maurepas Swamp, highlighting the urgent need for comprehensive coastal restoration and management strategies.

Zone XIII, corresponding to the Tchefuncte River Mouth, presents a complex coastal morphology that defies conventional accretion or erosion calculations. The 1853 historical map reveals a significant water inlet with a double coastline, while the 2023 landscape exhibits artificial lakes and predominantly water-covered wetlands, rendering comparable coastline delineation impossible. This zone encompasses the South East Madisonville/Mandeville Marsh, a critical saltwater coastal wetland classified as a marsh ecosystem, strategically located southeast of Madisonville and Mandeville in St. Tammany Parish. The marsh is characterized by typical coastal marsh vegetation, including reeds, spartina, and mangroves, which function as a natural buffer against flooding and storm events, providing essential ecological protection for adjacent communities. The complex hydrological and vegetative characteristics of this zone underscore the dynamic nature of coastal wetland systems and their critical role in regional environmental resilience.

Zone XIV, encompassing the Lewisburg Community, Mandeville City, and Fontainebleau State Park, demonstrates a notable land accretion of 7.82 km². The area's coastal transformation was predominantly driven by anthropogenic interventions during the late 19th and 20th centuries. The construction of hotels, summer residences, and the municipal pier in the second half of the 19th century, followed by extensive residential and commercial neighborhood developments throughout the 20th century, significantly altered the coastal landscape. A pivotal infrastructure project, the Causeway's northern section constructed in 1956, not only catalyzed urban development but also facilitated substantial artificial land reclamation through hydraulic fill techniques. These strategic interventions effectively expanded the urban footprint by incrementally gaining terrain from Lake Pontchartrain, representing a deliberate and systematic approach to urban expansion and coastal modification.

Zone XV, corresponding to the St. Tammany Refuge, exhibits coastal erosion of 4.63 km² within a protected area spanning approximately 19,400 hectares of diverse ecological landscapes, including wetlands, swamps, forests, and prairies. The complex vegetative composition renders the area vulnerable to multifaceted erosional processes driven by urban and agricultural development, alongside extractive industries such as petroleum, natural gas, and mining operations. These anthropogenic interventions have systematically compromised habitat integrity, resulting in significant ecological fragmentation and degradation. Compounding these challenges, recurrent hurricane events and flooding patterns have progressively eroded and destabilized the refuge's wetland and swamp ecosystems. The synergistic interaction between human-induced landscape modifications and extreme climatic events underscores the critical vulnerability of coastal ecological systems to persistent environmental pressures.

Zone XVI, the Big Branch Marsh National Wildlife Refuge, situated adjacently to the St. Tammany Refuge (Zone XV), encompasses approximately 7,300 hectares of ecologically diverse terrain, including wetlands, swamps, and forests. The current study reveals a land accretion of 5.43 km² within this critical ecological zone.

Zone XVII, encompassing the Irish Bayou, reveals a complex coastal morphology across approximately 80 km, characterized by interspersed erosion and accretion zones, resulting in a net erosion of 12.85 km². As a critical access point between the Gulf of Mexico and the Lake, this area has been significantly impacted by saltwater intrusion and hurricane-force winds throughout its historical development. The construction of communication bridges and residential communities has simultaneously contributed to land reclamation from surrounding water bodies, demonstrating the dynamic interaction between anthropogenic infrastructure and coastal landscape transformation.

4. Discussion

The study's findings were analyzed in light of previous research conducted in the relevant field of study. Despite the limitations of comparative assessments in precisely determining coastal accretion and erosion zones, they enabled an evaluation of coastal dynamic behavior, including variations in geomorphology, vegetation, granulometry, and other relevant factors. The bibliographic references corroborated the alignment between the identified accretion or erosion areas and the historical development of each zone. The presented evidence illustrates the considerable influence of human activities on the coastal landscape, exemplifying the intrinsic variability inherent to coastal systems.

Zones I to VII correspond to the New Orleans coastline along Lake Pontchartrain. The Lakefront Airport (Zone I), originally named Abraham Lazar Shushan, was constructed between 1929 and 1933 by the architectural firm Weiss, Dreyfous & Seiferth. The airport was constructed on an artificial peninsula reclaimed from the lake through the Lakefront Improvement Project and inaugurated on September 2, 1934 (figures 8 and 9). The construction of the airport necessitated the erection of a 3,048-meter (10,000-foot) containment wall in Lake Pontchartrain and the pumping of six million cubic yards (approximately 4,587,330 m³) of hydraulic fill to elevate the field above water. The airport was forced to close due to Hurricane Katrina until October 2005, when it reopened. During this period, the interior of the airport flooded to a depth of over 1.2 m, while the exterior was inundated by up to 2.4 m of water. Between 2008 and 2013, the airport underwent a period of renovation and restoration, with the aim of returning it to its original architectural form [37] & [38]. The latest research findings suggest that the land area has increased by 7.88 km².



Figure 8. This detail from a map of New Orleans and the surrounding area, dated 1925, is courtesy of the Library of Congress for [39]. It shows the Lakefront project accretion area. Source: <https://www.raremaps.com/gallery/detail/73429/map-of-the-city-of-new-orleans-and-vicinity-july-1925-guillot-adam>

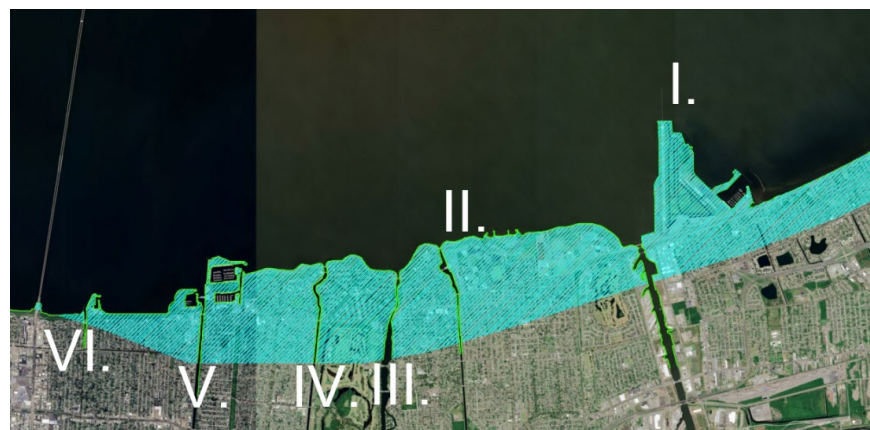


Figure 9. Accretion map for the Lakefront project. Source: own elaboration.

The Lakefront Improvement Project, which was carried out between the years 1926 and 1934, entailed the construction of a dike situated between 914 and 1,219 meters from the shoreline of the lake. The terrain situated between the dike and the 1926 coastline was subject to dredging and the gradual introduction of hydraulic fill. The dredging and filling process, which spanned a period of over three years, resulted in the accretion of 8.1 km² (2,000 acres) of land, with an elevation between 1.2 and 1.8 m (4 and 6 feet) above the lake level and approximately 3 m (10 feet) above the subsiding Lakeview and Gentilly lowlands. The construction of the stepped concrete dike was completed in 1930. Upon the conclusion of the project in 1934, the newly constructed neighborhoods, including Lake Vista, Lakeshore, Lake Terrace, and Lake Oaks, which were primarily developed in the post-World War II era, were established on both the reclaimed lands and the sites of historical riverside communities, namely Port Pontchartrain and Old Milneburg [39]. The project also had an impact on the Spanish Fort community, situated at the confluence of Bayou St. John and the Old Basin Canal, as well as the West End area along the New Basin Canal. The construction of the project led to the formation of land on the eastern side of West End, which was subsequently transformed into a harbor in 1938.

As has been previously outlined, the areas designated as zones II to VII encompass a variety of canals and natural streams. The Bayou St. John Canal, en route to the lake, traverses the ruins of the Bayou Saint John Fort, an edifice that was originally situated at the mouth of Bayou Saint John in Lake Pontchartrain (18th century). The remnants of the fort are currently visible in the area designated as Spanish Fort, a historic park in New Orleans, situated approximately 500 meters from the mouth of the canal. This location demonstrates the accretion that has occurred in the region (Figure 10). Prior to Hurricane Katrina, maintenance and reconstruction work was required on the 17th Street Canal. One such instance was the deterioration of the concrete walls observed during inspections conducted between 1980 and 1981. Following various approaches to a solution, a steel sheet pile retaining wall was constructed between 1992 and 1993 to support the concrete walls at the crest of the levee [20].



Figure 10. Current location of Fort St. John and distance to the mouth of the canal in Lake Pontchartrain. Source: Google Maps 2023.

A review of historical records reveals a series of projects and minor works of repair, reinforcement, modification, and new construction within the dikes of the drainage channels and the dikes in front of the lake. These efforts were undertaken with the objective of safeguarding the city [19]. Following the completion of the analysis and a comparison of the results with those of previous research, it can be concluded that the 16.15 km² of accretion obtained during this research is in accordance with the historical development of these areas.

Zones VIII to XII (figure 11), spanning from Maurepas Swamp to Manchac Wildlife Management Area, have experienced significant land loss historically. According to Krauss [40], the swamp has dramatically diminished, with only 30% maintaining a closed forest canopy, 58% in transition, and 12% existing as severely degraded open wet-lands. Primary land loss originates from increased water salinity, critically impacting freshwater ecosystems dominated by bald cypress and water tupelo, which are extremely sensitive to saline intrusion. The PO-29: River Reintroduction into Maurepas Swamp project aims to reintroduce Mississippi River water to maintain annual salinity below critical ecological thresholds [26]. Erosion is multifactorial, associated with residential, commercial, and agricultural expansion, wetland drainage, and land-use transformations that fundamentally alter ecosystem dynamics. Couvillion et al. [30] demonstrated that episodic events like hurricanes significantly contribute to coastal land loss. Annual erosion rates increased from -30.46 km²/year (1985-2004) to -42.92 km²/year (1985-2010), reflecting an accelerated land loss trend. Hurricanes induce complex ecological stress through elevated salinity and sulfur levels, potentially triggering long-term vegetation degradation. Steyer et al. [41] highlighted a critical phenomenon where storm impacts are not immediately visible but manifest consistently months after the event. The research revealed that storm-induced stress contributes to observed land losses, with some areas showing delayed ecological deterioration. This comprehensive analysis aligns with previous studies by Barras et al. [31], confirming the research group's finding of 57.64 km² erosion as a faithful representation of swamp, wetland, and vegetation loss in the described zones. The results underscore the complex, interconnected nature of coastal ecosystem transformation, driven by both natural and anthropogenic processes.

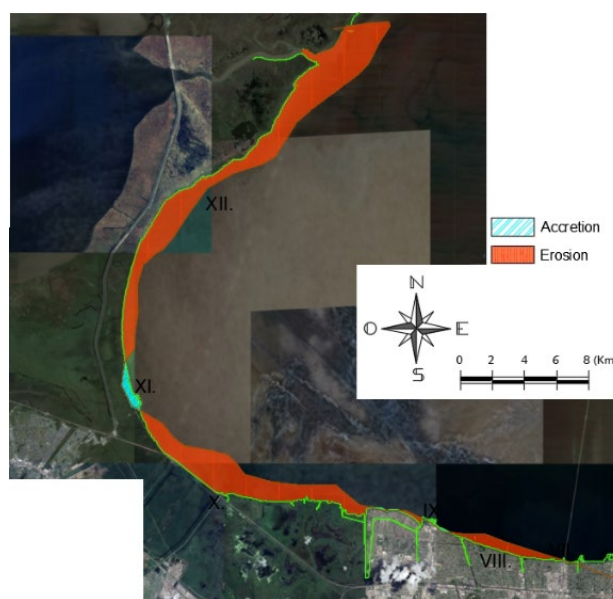


Figure 11. Erosion and accretion in zones VIII-XII. Source: Own elaboration on aerial image of Google Maps 2023.

Zona XIV Mandeville (figure 12), Comunidad Lewisburg y parque estatal Fontainebleau. Mandeville is situated on an elevated platform formed during the last glacial era along the northern coast of Lake Pontchartrain. The town spans 2.5 kilometers of temperate lakefront. The landscape is characterized by a diverse array of vegetation, including oak, magnolia, cypress, and pine trees, with the primary waterways being Bayou Chinchuba, Bayou Castine, and Ravine aux Coquilles. Since the late 19th century, urban planning has employed a series of strategic guidelines to preserve high-quality built environments. These include the provision of spacious lots, building setbacks, controlled residential and commercial densities, and a 35-foot height limit, which is designed to maintain tree canopy dominance. The Mandeville Lakefront Project of 1834, initiated by Jean Bernard de Mandeville, resulted in the creation of a two-kilometer passive park through the implementation of a protection agreement. During its golden era (1870-1930), the area was characterized by the presence of numerous private and public piers, steamboat traffic, an electric railway, and bathhouses. Presently, the only remaining structures are the reconstructed lookout and fountain. Lewisburg, a community established in the 1770s between Bayou Castine and the Tchefuncte River, acquired its current name in 1833 when Joshua Lewis's heirs christened the parcel in his honor. The Parks and Greenways Commission has continued to adopt landscaping standards with the objective of protecting existing vegetation and requiring the replacement of lost trees [42].



Figure 12. Accretion in the XIV Mandeville zone. Source: Own elaboration on aerial image of Google Maps 2023.

Ellis [43] posits that in 1862, as a consequence of the Civil War, all docks and wharves were burned with the intention of impeding the approach of the Union ship and its soldiers. In 1880, the Poitevent & Favre sawmill was established in Lewisburg, situated in close proximity to the present-day Lake Pontchartrain Causeway, specifically in the area that is currently located just off the north toll plaza. The construction of the Lake Pontchartrain Causeway commenced in two phases in 1956. The initial phase of construction, which spanned from 1956 to 1958, entailed the erection of the inaugural section of the two-lane bridge, which measured 24 kilometers (or 15 miles) in length. In the second phase (1966-1969), the bridge was widened due to an increase in traffic by the addition of a second parallel section [44]. The disparate historical sources pertaining to the region indicate that the 7.82 km² accretion value is an appropriate estimation.

Zone XV St. Tammany Wildlife Refuge (figure 13), is situated within St. Tammany Parish, constituting a component of a larger acquisition procured by the state from Great Southern Lumber Company in 1938. Approximately 5.3 km² (1,310 acres) of the original purchase remain a wildlife refuge owned by LDWF. Erosion caused by wave action from Lake Pontchartrain has reduced the original refuge acreage [45] The results of this study,

which demonstrate shoreline erosion of 4.63 km², are considered to be in accordance with previously conducted surveys.

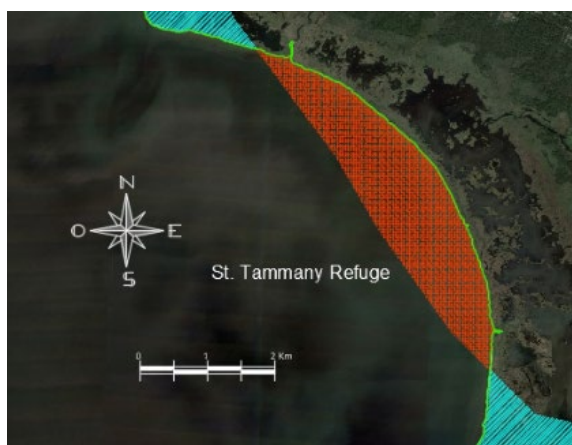


Figure 13. Erosion in zone XV St. Tammany Refuge. Source: Own elaboration on aerial image of Google Maps 2023.

The present study yielded an accretion value of 5.43 km² in Zone XVI of the Big Branch Marsh National Wildlife Refuge (figure 14). This favorable result may be attributed to the reconstruction projects and works carried out in the aftermath of Hurricane Katrina in 2005. These include the reconstruction of the Boy Scout Road Trail boardwalk in 2007, the replanting of trees in the refuge during 2006-2007 and the restoration of the marsh in the refuge [46]. The Fish and Wildlife Service (2007) also undertook marsh restoration in the Goose Point and Point Platte areas in 2008. This involved the installation of tree fences in certain areas of the marsh, which serve to reduce wave action, trap sediment, and combat erosion [47].

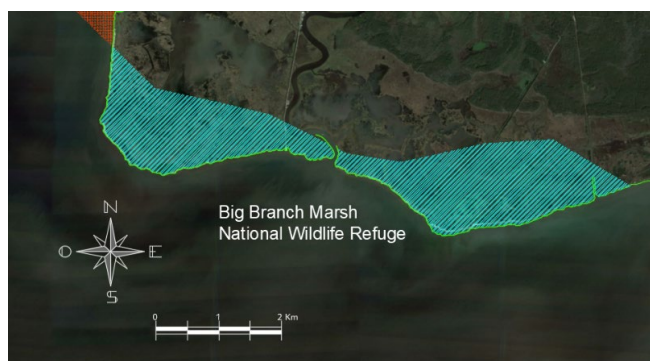


Figure 14. Accretion in the zone XVI Big Branch Marsh National Wildlife Refuge. Source: Own elaboration on aerial image of Google Maps 2023.

The last area, XVII Irish Bayou (figure 15), shows erosion of its 12.85 km² shoreline. However, there are small sections in the area where the result has been favorable, i.e., accretion. Since Hurricane Katrina destroyed part of the study area, improvement and prevention plans and projects have been implemented. Most recently, as described by Bollfrass in 2022 [48], the Bayou Sauvage Marsh Creation project involves the installation of over 3,000 m (10,000 linear feet) of articulated concrete mats along the shoreline of Lake Pontchartrain to form hurricane protection levees in eastern New Orleans. Hydraulically dredge material from Lake Pontchartrain to create 0.8 km² (200 acres) of marsh and nourish 0.04 km² (10 acres) of broken marsh, for a total benefit of between 0.8 and 1.0 km² (200-250 acres) at the end of implementation. The history of post-Katrina protection efforts

and future plans show that the area has been severely impacted, and the erosion results from this research group are consistent. The study by the Coalition to Restore Coastal Louisiana [49] shows that as wetlands and barrier islands are lost, even areas once considered safe, such as Irish Bay, become more vulnerable to flooding and storm damage.

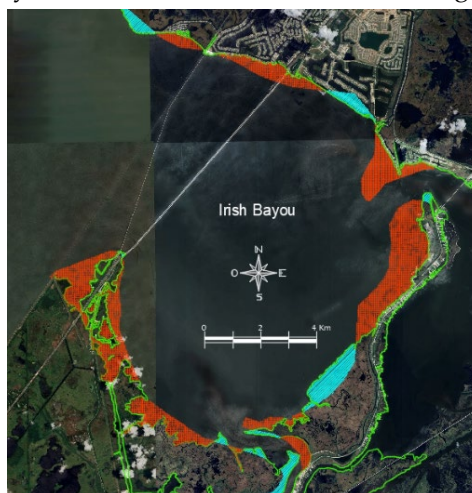


Figure 15. Erosion and accretion in the XVII Irish Bayou zone. Source: Own elaboration on aerial image of Google Maps 2023.

As indicated by the Coastal Protection and Restoration Authority of Louisiana in 2017 [50], the projected land change along the Louisiana coastline over the next 50 years under an intermediate environmental scenario in the absence of the requisite mitigation measures is analogous to the land loss observed in Figure 16. The red indicates areas that are expected to be lost, while the green color corresponds to potential land accretion. Similarly, the 2017 Coastal Master Plan incorporates projects that will effectively mitigate flood damage along the coast at various levels. Communities situated along the Lake Pontchartrain shoreline, particularly Slidell, Lacombe, Mandeville, Madisonville, and Ruidock, will benefit from the implementation of structural protection projects. Additionally, the Master Plan identifies numerous locations where structural and non-structural projects will be implemented concurrently to provide risk reduction.

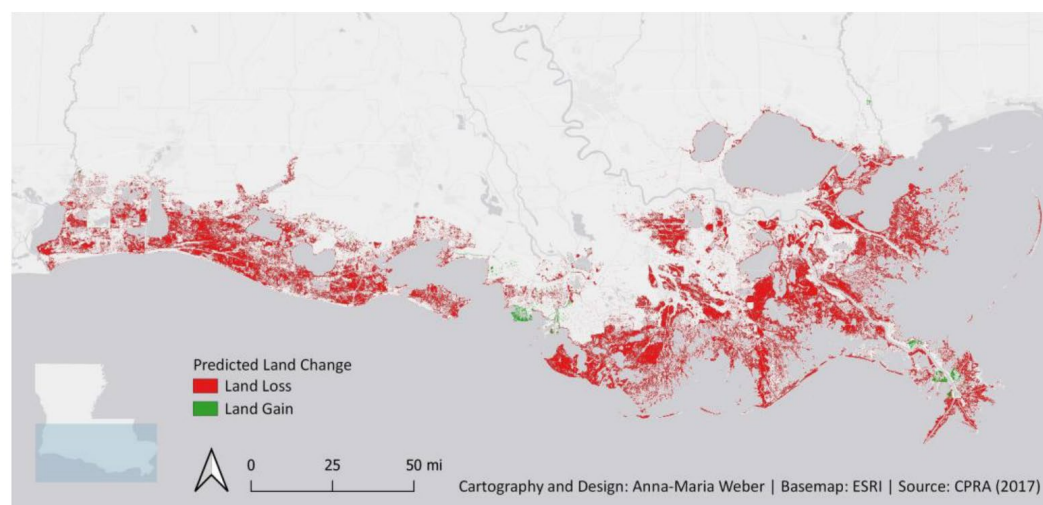


Figure 16. Massive land loss projected over the next 50 years according to CPRA, 2017. Source: [50].

Couvillion et al. (2011), which demonstrate that erosion in the study area is significantly greater than the accretion observed.

Basin	1932–56	1956–73	1973–75	1975–77	1977–85	1985–88	1988–90	1990–95
Loss								
Pontchartrain	-34.41	-32.50	-12.74	-12.84	-9.47	-6.88	-9.67	-11.07
Basin	1932–56	1956–73	1973–75	1975–77	1977–85	1985–88	1988–90	1990–95
Gain								
Pontchartrain	1.59	1.69	0.61	0.17	0.30	0.16	0.28	0.20

Figure 19. Persistent land loss and land gain on the Lake Pontchartrain shoreline, as defined by the Coastal Wetlands Planning, Protection, and Restoration Act Program (n.d.), 1932–2010. Source: [30].

The findings of the Coastal Protection and Restoration Authority of Louisiana in 2017 [50] indicate that, in the absence of adherence to the proposed plan, coastal Louisiana is at risk of losing between 2,118 and 4,677 km² of land over the next 50 years. Conversely, the implementation of the protection and restoration projects outlined in the Master Plan has the potential to mitigate between 40% and 75% of this projected loss. The long-term maintenance of project effects has been most effectively achieved in areas exhibiting low rates of sea-level rise and subsidence, with a reliable source of sediment to support the natural accretion of marshlands.

5. Conclusions

The integration of the current findings with previous information available in the scientific literature enriches the understanding of the behavior and dynamics of the coastline in the study area, contributing to a more complete and informed vision of the analyzed phenomenon.

The article presents a historical analysis of the evolution of the coastal landscape in response to anthropogenic influences. While this case study does not consider the socio-economic impact, which constrains the analysis of the consequences of coastal landscape alteration for the population surrounding the study area, this research does illustrate the historical consequences of various decisions, actions, and policies on the coastal landscape, both governmental and social. Such consequences have implications for the environment and the socioeconomic situation that will persist over time.

The findings of the present study were contextualized within the existing body of research on the subject matter, thereby substantiating the hypothesis that the identified areas of accretion or erosion are consistent with the historical evolution of each specific zone. This evidence substantiates the assertion that human activities have exerted a significant influence on the coastal landscape.

The identified accretion areas are associated with infill projects, infrastructure construction and urban development. In contrast, the erosion areas are linked to natural processes, including subsidence, sea level rise and the impact of hurricanes, as well as human activities such as wetland fragmentation and degradation.

The investigation of this third case study reveals a significant and concerning loss of area, amounting to 75.12 km², which is predominantly situated within the wetland and swamp ecosystems of the region. In addition to the factors described in the preceding paragraph, it is evident that human activities, including infrastructure construction, pollution, and urban development, have further fragmented and degraded the ecosystems.

The research findings reveal a profound transformation of the Lake Pontchartrain coastal landscape, demonstrating that anthropogenic interventions have systematically

altered ecosystem structures, resulting in substantial modifications to wetland, marsh, and forest environments. These changes underscore the critical vulnerability of coastal ecosystems to human-induced landscape transformations.

Author Contributions: Conceptualization and methodology, González Rodríguez, S.V. and Negro Valdecantos, V.; software, González Rodríguez, S.V. and del Campo, J.M.; validation and formal analysis, González Rodríguez, S.V. and Negro Valdecantos, V.; investigation, González Rodríguez, S.V.; resources, González Rodríguez, S.V.; Negro Valdecantos, V. and del Campo, J.M.; data curation, González Rodríguez, S.V.; writing—original draft preparation, González Rodríguez, S.V. and Torrodero Numpaque, V.; writing—review and editing, González Rodríguez, S.V.; Negro Valdecantos, V.; Torrodero Numpaque, V. and del Campo, J.M.; visualization and supervision, Negro Valdecantos, V.; project administration, González Rodríguez, S.V. and Negro Valdecantos, V.; funding acquisition, del Campo, J.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the “Fundación Agustín de Betancourt” their institutional and financial support.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- [1] G. Prasetya, "Chapter 4 Protection From Coastal Erosion," in Coastal protection in the aftermath of the Indian Ocean tsunami: What role for forests and trees?. Compilation proceedings of the Regional Technical Workshop in Khao Lak, Thailand (August 28–31, 2006), Thailand, CFAO Regional Office for Asia and the Pacific, 2007, pp. 103–131.
- [2] J. J. Diez, «La transformación del paisaje litoral,» O.P. Ingeniería y territorio, vol. II, nº N° 55 El Paisaje en la Ingeniería, pp. 38–47, 2001.
- [3] S. V. González Rodríguez, V. Negro Valdecantos, J. J. Diez González, J. M. del Campo and M. Martín-Antón, "Comparing the Effects of Erosion and Accretion along the Coast of Cartagena De Indias, Colombia," Journal of Coastal Research, 37(6), vol. 37, no. 6, p. 1204–1223, 2021.
- [4] M. Martín-Antón, "Obras públicas, evolución y paisaje costero. De la Situación en España al Gigantismo Asiático," Universidad Politécnica de Madrid, Madrid - España., 2018.
- [5] S. V. González Rodríguez, V. Negro Valdecantos, J. M. del Campo and V. Torrodero Numpaque, "Comparing the Effects of Erosion and Accretion along the Eastern Coast of Río de Janeiro and Guanabara Bay in Brazil," Sustainability, vol. 16, no. 5728, 2024.
- [6] Y. Yin-can, "Marine Geo-Hazards in China,," Science Direct, pp. 269–296, 2017.
- [7] Y. Mazda, M. Michimasa, T. Miyagi and D. Kobashi, "Coastal erosion due to long-term human impact on mangrove forests," Wetlands Ecology and Management, vol. 10, pp. 1–9, 2002.
- [8] M. Martín-Antón, V. Negro Valdecantos, J. M. del Campo, J. S. López-Gutiérrez and M. D. Esteban, "Review of coastal Land Reclamation situation in the World," Journal of Coastal Research, vol. 75, pp. 667–671, 2016.
- [9] R. T. Saucier, Geomorphology and Quaternary Geologic History of the Lower Mississippi Valley, 1 ed., Urbana-Champaign, Illinois: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1994, p. 400.
- [10] T. H. Dixon, A. Ferretti, F. Amelung and F. Novali, "Subsidence and flooding in New Orleans," Nature, vol. 441, no. 7093, pp. 587–588, 2006.
- [11] T. E. Törnqvist, D. J. Wallace, J. E. Storms, J. Wallinga, R. L. Van Dam, M. Blaauw and E. M. Snijders, "Mississippi Delta subsidence primarily caused by compaction of Holocene strata. Nature Geoscience," Nature Geoscience, vol. 1, no. 3, pp. 173–176, 2008.

- [12] J. Flocks, M. Kulp, J. Smith and S. J. Williams, "Review of the Geologic History of the Pontchartrain Basin, Northern Gulf of Mexico," *Journal of Coastal Research*, vol. SI, no. 54, p. 12–22, 2009. 840
841
- [13] S. Van Asselen, G. Erkens, M. E. Keogh and R. Stuurman, "Shallow subsidence vulnerability in the city of New Orleans, southern USA," *Hydrogeology Journal*, p. 867–889, 2023. 842
843
- [14] N. O. D. U.S. Army Corps of Engineers, "Lake Pontchartrain & Vicinity, Louisiana General Re-Evaluation Report with Integrated Environmental Impact Statement," St. Charles, Jefferson, Orleans, and St. Bernard Parishes, Louisiana, 2021. 844
845
846
- [15] J. Flocks, J. Kindinger, M. Marot and C. Holmes, "Sediment Characterization and Dynamics in Lake Pontchartrain, Louisiana," *Journal of Coastal Research*, vol. SI, no. 54, p. 113–126, 2009. 847
848
- [16] E. Beerman, "EL TRATADO DE SAN ILDEFONSO (1800) Y EL ÚLTIMO GOBERNADOR ESPAÑOL DE LA LUISIANA," *Cabildo Insular de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, España*, 2000. 849
850
- [17] C. E. Colten, *A River and Its City: The Nature of Landscape in New Orleans*, Berkeley, California: University of California Press, 2005, p. 283. 851
852
- [18] R. Campanella, *Time and Place in New Orleans: Past Geographies in the Present Day*, Gretna, Louisiana: Pelican Publishing, 2002, p. 203. 853
854
- [19] R. B. Seed, B. R. G., A. R. I., A. G. Athanasopoulos, G. P. Boutwell, J. D. Bray, J.-L. Briaud, C. Cheung, D. Cobos-Roa, J. Cohen-Waeber, B. D. Collins, L. Ehrensing and D. Farber, *Investigation of the Performance of the New Orleans Flood Protection Systems in Hurricane Katrina on August 29, 2005*, vol. I: Main Text and Executive Summary, New Orleans: National Academies Press, 2006, p. 690. 855
856
857
858
- [20] J. D. Rogers, "Development of the New Orleans Flood Protection System prior to Hurricane Katrina," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 134, no. 5, pp. 602-617, 2008. 859
860
- [21] M. G. Curry, S. W. Holder and B. D. Burglass, "Final Jefferson Parish, Louisiana. Coastal Zone Management Program," *Jefferson Parish Environmental and Development Control Department. Louisiana Department of Natural Resources (CPRA), Metairie, Louisiana*, 1982. 861
862
863
- [22] American Society of Civil Engineers (ASCE), "The Lake Pontchartrain Causeway Bridge, 1956-2012," *Journal of the Louisiana Section*, vol. 21, no. 3, 2013. 864
865
- [23] T. R. Witcher, "Lake Pontchartrain Causeway," *Civil Engineering*, vol. 87, no. 5, pp. 42-45, 2017. 866
- [24] American Society of Civil Engineers - ASCE, "Structural design and construction of the Lake Pontchartrain Causeway," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 26, no. 4, pp. 123-130, 2021. 867
868
- [25] B. D. Merrill, "Condition Evaluation of the JFK Causeway Post-tensioned Segmental Bridge," *ASPIRE*, vol. Summer, pp. 20-23, 2021. 869
870
- [26] Coastal Protection and Restoration Authority (CPRA), "Maurepas (River Reintroduction into Maurepas Swamp Project)," 2023. [Online]. Available: <https://coastal.la.gov/news/maurepas/>. 871
872
- [27] D. H. Usner Jr., *Indians, Settlers, and Slaves in a Frontier Exchange Economy. The Lower Mississippi Valley Before 1783*, Williamsburg, Virginia: University of North Carolina Press, Omohundro Institute of Early American History and Culture, 1992, p. 314. 873
874
875
- [28] S. L. Dawdy, *Building the Devil's Empire* ([edition unavailable]), vol. (Original work published 2008), The University of Chicago Press, 2008. 876
877
- [29] C. E. Colten, *An Unnatural Metropolis: Wrestling New Orleans from Nature*, LSU Press, 2005, p. 264. 878
- [30] B. R. Couvillion, J. A. Barras, G. D. Steyer, W. Sleavin, M. Fischer, H. Beck, N. Trahan, B. Griffin and D. Heckman, "Land Area Change in Coastal Louisiana from 1932 to 2010," *Pamphlet, Virginia*, 2011. 879
880

- [31] J. A. Barras, J. C. Bernier and R. A. Morton, "Land Area Change in Coastal Louisiana: A Multidecadal Perspective (from 1956 to 2006)," Pamphlet to accompany, Virginia, 2008. 881
882
- [32] J. M. Visser, C. E. Sasser, R. H. Chabreck and R. Linscombe, "Marsh Vegetation Types of the Mississippi River Deltaic Plain," *Estuaries*, vol. 21, no. 4, pp. 818-828, 1998. 883
884
- [33] J. M. Visser, C. E. Sasser, R. H. Chabreck and R. G. Linscombe, "The impact of a severe drought on the vegetation of a subtropical estuary," *Estuaries*, vol. 25, no. 6A, pp. 1184-1195, 2002. 885
886
- [34] St. Tammany Parish Police Jury, "St. Tammany Parish Local Coastal Program," St. Tammany Parish, 1992. 887
- [35] R. Lowry, *A history of Mississippi: from the discovery of the great river by Hernando DeSoto, including the earliest settlement made by the French under Iberville, to the death of Jefferson Davis*, Michigan: Jackson, Miss. : R.H. Henry & Co., 1891, p. 679. 888
889
890
- [36] Y. Álvarez-Rogel and C. Conesa García, "eorreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España)," *GeoFocus (Artículos)*, vol. 21, pp. 101-118, 2018. 891
892
893
- [37] "New Orleans Lakefront Airport," [Online]. Available: <https://lakefrontairport.com/about/>. 894
- [38] Louisiana Hometown. Hometown Productions - Broadcasting & Media, "New Orleans Lakefront Airport Terminal Rededication," 2013. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=0Y9E3jSHxVc>. 895
896
- [39] R. Campanella, "Turning Water Into Land; How New Orleans Created the Lakefront Neighborhoods, 1926-1934," *New Orleans Times-Picayune*, 13 April 2018. 897
898
- [40] K. S. G. K. R. C. J. W. W. a. H. S. Krauss, "Performance measures for a Mississippi River reintroduction into the forested wetlands of Maurepas Swamp," *Coastal Protection and Restoration Authority*, 2017. 899
900
- [41] G. D. Steyer, K. F. Cretini, S. Piazza, L. A. Sharp, G. A. Snedden and S. Sapkota, *Hurricane Influences on Vegetation Community Change in Coastal Louisiana*, Lafayette: USGS National Wetlands Research Center, 2010. 901
902
- [42] City of Mandeville City Hall, "Mandeville, a Historic Lakefront Community," 2024. [Online]. Available: <https://www.cityofmandeville.com/>. 903
904
- [43] S. Ellis, *St. Tammany: L'autre Cote du Lac*, Pelican Pub Co Inc, 1981, p. 304. 905
- [44] E. Editorial, "Puente sobre el lago Pontchartrain, el puente más largo del mundo," *Informes de la Construcción*, vol. 10, p. 65-73, 1957. 906
907
- [45] Department of Louisiana Wildlife & Fisheries, "Louisiana Wildlife & Fisheries," 2024. [Online]. Available: <https://www.wlf.louisiana.gov/page/st-tammany-wildlife-refuge>. 908
909
- [46] U.S. Fish and Wildlife Service, "Comprehensive Conservation Plan and Environmental Assessment for Big Branch Marsh National Wildlife Refuge, St. Tammany Parish, Louisiana," U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Southeast Region, New Orleans, 2007. 910
911
912
- [47] Departamento del Interior de los Estados Unidos, "Salazar participa en el proyecto de restauración de pantanos en la Reserva Nacional de Vida Silvestre Big Branch en celebración del Día Nacional de las Tierras Públicas," Departamento del Interior de los Estados Unidos, 2024. 913
914
915
- [48] K. Bollfrass, "Coastal Wetlands Planning Protection & Restoration Act. 32nd Priority Project List," 2022. 916
- [49] Coalition to Restore Coastal Louisiana, *No Time to Lose: Facing the Future of Louisiana and the Crisis of Coastal Land Loss*, Louisiana: Coalition to Restore Coastal Louisiana, 1999, p. 66. 917
918
- [50] Coastal Protection and Restoration Authority of Louisiana, "Louisiana's Comprehensive Master Plan for a Sustainable Coast," State of Louisiana, Baton Rouge, LA, 2017. 919
920

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

921
922
923

Anexos

Anexos

Anexo 01: Bahía de Cartagena de Indias, mapa histórico de 1780.

Anexo 02: Bahía de Cartagena de Indias, composición fotografías aéreas, Google Earth, 2018.

Anexo 03: Bahía de Cartagena de Indias, batimetría obtenida de Navionics.

Anexo 04: Bahía de Cartagena de Indias, superposición de líneas de costa 1780/2018.

Anexo 05: Río de Janeiro y Bahía de Guanabara, mapa histórico de 1869.

Anexo 06: Río de Janeiro y Bahía de Guanabara, composición fotografías aéreas, Google Earth, 2022.

Anexo 07: Río de Janeiro y Bahía de Guanabara, superposición de líneas de costa 1869/2022.

Anexo 08: Nueva Orleans y Lago Pontchartrain, mapa histórico de 1853.

Anexo 09: Nueva Orleans y Lago Pontchartrain, composición fotografías aéreas, Google Earth, 2023.

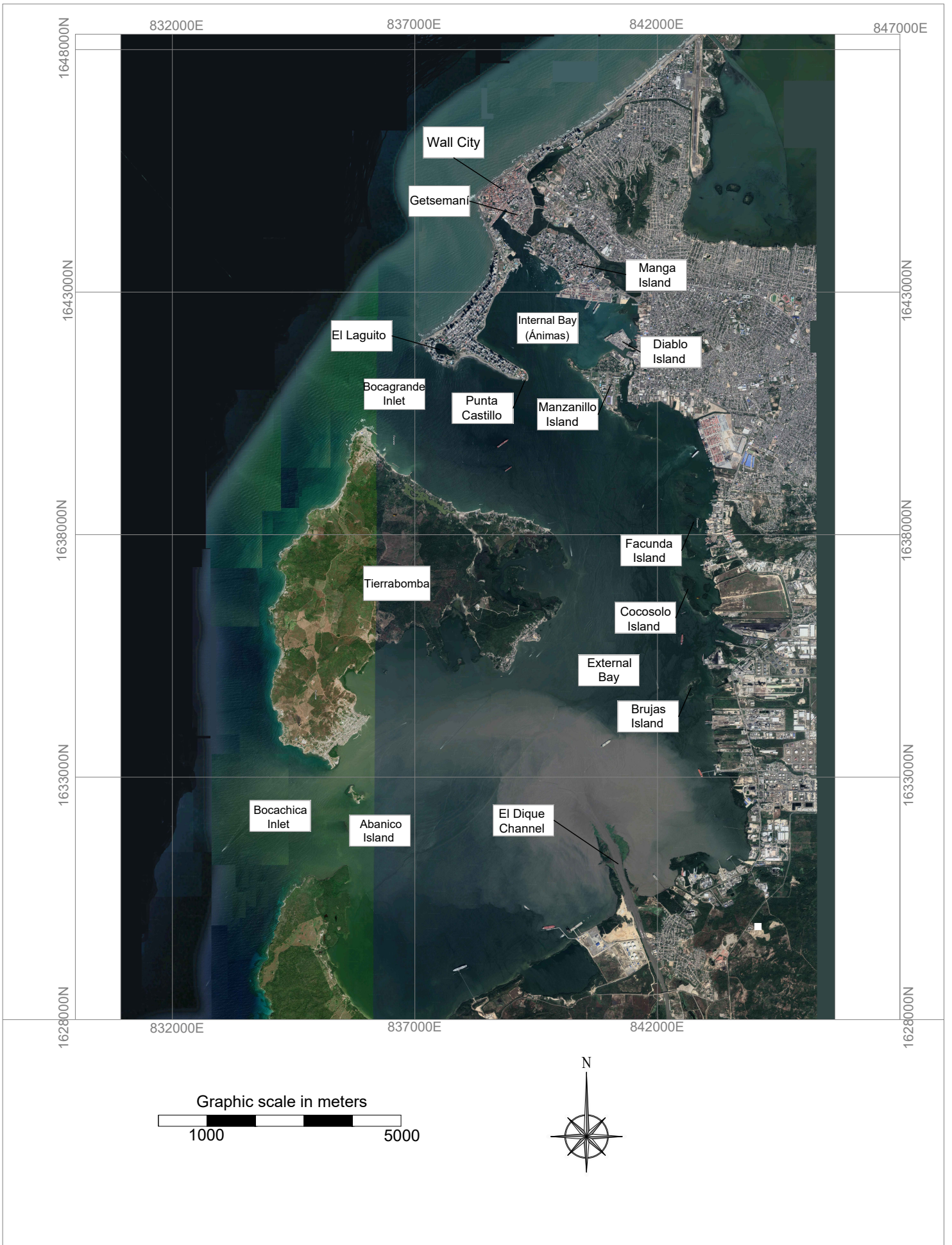
Anexo 10: Nueva Orleans y Lago Pontchartrain, superposición de líneas de costa 1853/2023.

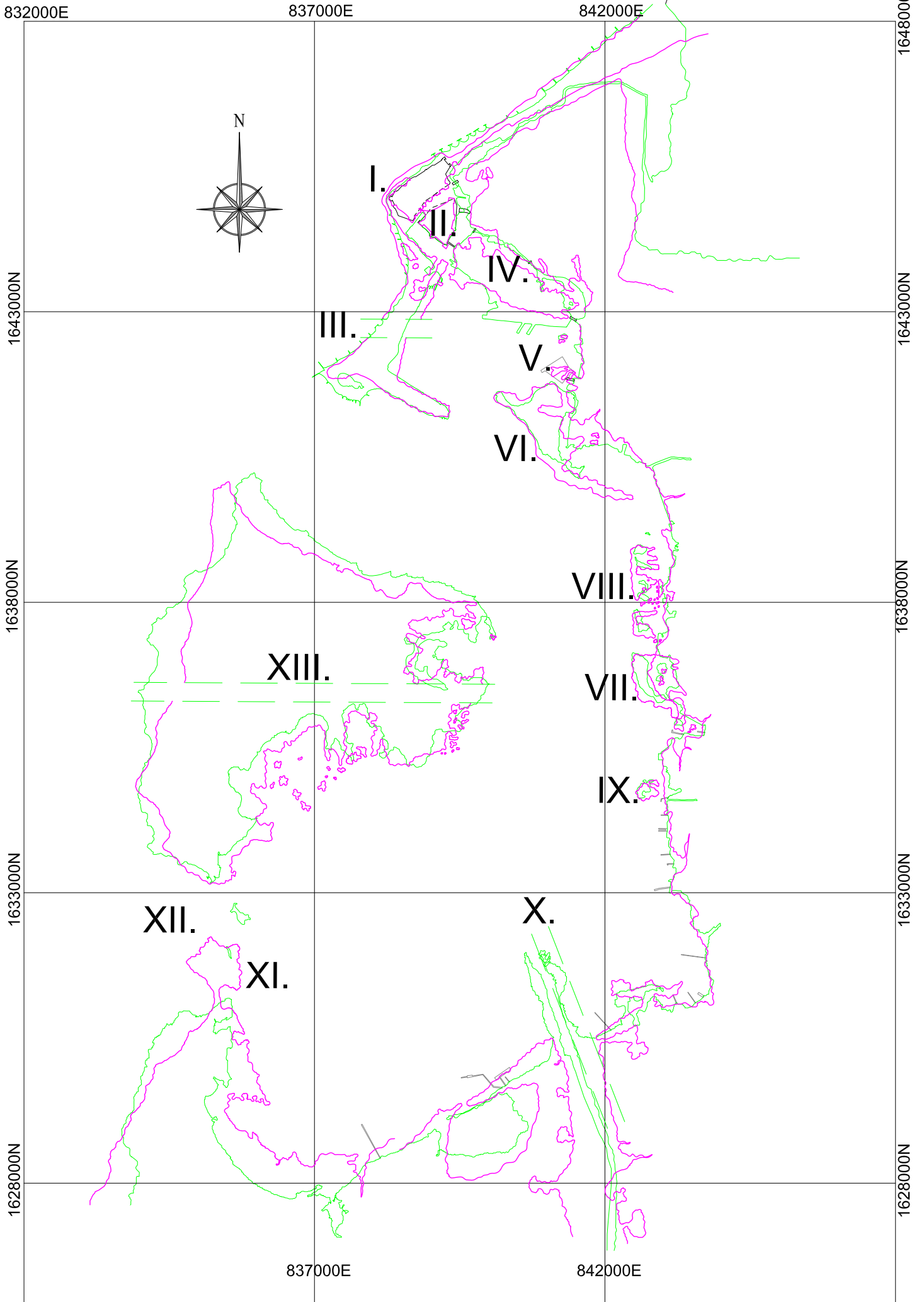
PLANO DEL PUERTO DE CARTAGENA DE YNDIAS

- | | | | |
|--|--|-------------------------------------|---------------------------|
| A Cartagena. | K Sa. Machina. | V Uajo de la Corona. | y Buena Vista. |
| B Jesumaria. | L Alm. de Poudre de la Plaza. | X Castillo de S ⁿ Josef. | J Alameda. |
| C Castillo de S ^t . Juario. | M Escollera de Sagrante. | a Punta de Gigante. | m Isla de Brujas. |
| D Comodoro de la Gopa. | N Punta de Obispos. | b Polona. | n Faja de Conspique. |
| E Fortaleza del Castillo. | O Punta de Chamba. | c Cocio. | o Cocoso. |
| F Isla y Pueblo de Manga. | P Los Castillejos. | d Steeraxa. | p Albornos. |
| G Frangidos del Rey. | Q Fortaleza del Angel. | e Cienega Honda. | q Miraflores. |
| H Faja de Llan. | R Castillo de S ⁿ . Fernando. | f Bafaire. | r Uoca de Candil. |
| Y Boscage. | S Pueblo de Vocachuco. | g Pueblo de Pasacavallos. | s Uajos de la Cruz. |
| J Almacen de Poudre de Navarra. | T Remedio Pobres. | h Caño de Pasacavallos. | t Caño de Juan de Angola. |

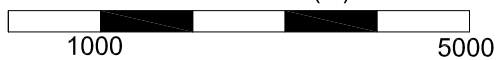
Escala de media Legua Maritima.
y qual a 3150. Varas Castellanas.







Escala Gráfica (m)



Línea de costa 1780

Línea de costa 2018