



Cartagena frente al ascenso del nivel del mar; Estrategias de resiliencia y adaptación al cambio climático mediante sistemas de información geográfica.

Modalidad: Proyecto de investigación

Fredy Andrés Trujillo Rojas

1031808662

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías
Tecnología en Levantamientos Topográficos
Bucaramanga, 10 marzo 2026



Cartagena frente al ascenso del nivel del mar; Estrategias de resiliencia y
adaptación al cambio climático mediante sistemas de información geográfica
Proyecto de Investigación

Fredy Andres Trujillo Rojas

1031808662

Trabajo de Grado para optar al título de
Tecnólogos en Levantamientos Topográficos

DIRECTOR

M.Sc Héctor Alfonso Correa Rangel

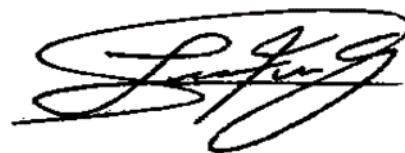
Grupo de Investigación en Medio Ambiente y Territorio – GRIMAT

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías
Tecnología en Levantamientos Topográficos
Bucaramanga 20 de agosto de 2026

Nota de Aceptación

APROBADO

En cumplimiento de los requisitos exigidos por las
Unidades Tecnológicas de Santander para optar al
título de Tecnólogo en Levantamientos Topográficos
según acta # 28 del comité de proyectos de grado
del programa, el día 25 de septiembre del 2026



Leonardo Favio Gómez Mejía

Firma del Evaluador



Héctor Alfonso Correa Rangel

Firma del Director

DEDICATORIA

En primer lugar, le dedicamos todo este proceso a Dios padre, ya que por el logramos concluir este proceso, igualmente este proyecto está dedicado a mis padres y a mi familia, por su cariño y amor apoyo y confianza que me brindaron en todo este proceso, y a todas esas personas compañeros, amigos, y demás que me ayudaron brindándome palabras de motivación para concluir mi proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos principalmente a Dios ya que fue el que me dio la fortaleza y perseverancia necesaria para poder concluir con este trabajo.

Igualmente agradezco profundamente a mi familia por su amor, apoyo y por confiar en mi en todo momento de este proceso.

También a mis docentes por compartirme su conocimiento, y su paciencia para orientarme y brindarme todas las herramientas de trabajo, especialmente agradezco al docente Héctor Correa, ya que fue el docente que estuvo pendiente en todo momento de este proyecto, y gracias a él se pudo concluir.

TABLA DE CONTENIDO

<u>RESUMEN EJECUTIVO</u>	<u>10</u>
<u>INTRODUCCIÓN</u>	<u>12</u>
<u>1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN</u>	<u>13</u>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.2. JUSTIFICACIÓN	15
1.3. OBJETIVOS	15
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	16
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4. ESTADO DEL ARTE	16
<u>2. MARCO REFERENCIAL</u>	<u>18</u>
2.1. MARCO TEÓRICO	18
2.1.1. CAMBIO CLIMÁTICO	18
2.1.2. ASENSO DEL NIVEL DEL MAR	19
2.1.3. DINÁMICA Y VULNERABILIDAD DE ZONAS COSTERAS	20
2.1.4. RIESGO CLIMÁTICO	21
2.1.5. RESILIENCIA FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO	22
2.1.6. SIG (SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA)	22
2.2. MARCO CONCEPTUAL	23
2.3. MARCO LEGAL	25
<u>3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN</u>	<u>26</u>
<u>4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO</u>	<u>27</u>

F-DC-125 INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO
DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO, MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO VERSIÓN: 2.0

4.1. UBICAR Y CARTOGRAFIAR	27
4.1.1. UBICAR A CARTAGENA DE INDIAS	27
4.1.2. ANÁLISIS TEMPORAL EN LA COSTA DEL MUNICIPIO DE CARTAGENA	33
4.1.3. ANÁLISIS DE INUNDACIONES POR EL ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR.....	40
<u>5. RESULTADOS.....</u>	<u>44</u>
5.1. SINTESIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.....	44
5.1.1. ZONAS DE MAYOR AFECTACIÓN DE INUNDACIÓN	44
5.1.2. PROPUESTAS PARA LA ADAPTACIÓN	48
<u>6. CONCLUSIONES.....</u>	<u>49</u>
<u>7. RECOMENDACIONES</u>	<u>50</u>
<u>8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</u>	<u>51</u>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del municipio de Cartagena de indias	27
Figura 2. Mapa de las comunas y localidades el municipio de Cartagena de indias.	28
Figura 3. Mapa de sub zonas hidrográficas del municipio de Cartagena de indias	29
Figura 4. Mapa de clasificación del suelo de Cartagena	30
Figura 5. Modelo digital de elevación municipio Cartagena	31
Figura 6. Mapa hipsométrico del municipio de Cartagena	32
Figura 7. Método MDNWI imagen landsat 1991	34
Figura 8. Método MDNWI imagen landsat 5 2001.....	35
Figura 9. Método MDNWI landsat 8 2014	36
Figura 10. Método MDNWI landsat 8 2020	37
Figura 11. Método MNDWI landsat 8 2023	38
Figura 12. Método MNDWI landsat 8 2026	39
Figura 13. Mapa de pendientes Clasificado según el IGAC	40
Figura 14. Mapa de inundaciones por aumento del nivel del mar según el INVEMAR	42
Figura 15. Mapa de vulnerabilidad costera	44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de riesgo de inundación	46
Tabla 2. Matriz Amenaza Costera	47
Tabla 3. Tabla de Propuestas para adaptación a asenso del nivel del mar	48

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo tuvo como objetivo el identificar las zonas de mayor amenaza de inundaciones por asenso del nivel del mar y en el municipio de Cartagena de indias, perteneciente al departamento de Bolívar, así mismo proponer algunas soluciones para ayudar a la gente a adaptarse a estos hechos climáticos.

Para el desarrollo de esta investigación de enfoque cuantitativo y descriptivo, con la ayuda de las SIG (Sistemas de Información Geográfica), que nos permitió indagar y descargar capas vectorial para la descripción cartográfica del terreno, así mismo información satelital como el DEM (modelo digital de elevación) y algunas imágenes de los satélites Landsat 5 y Landsat 8, que con un índice muy usado en la teledetección y en el estudio de inundaciones gracias a su precisión el cual es el MNDWI (Índice de Diferencia Normalizada del Agua), Gracias a esto, se efectuó el análisis y la identificación de las zonas de mayor afectación por el ascenso del nivel del mar, las zonas más amenazadas y las más vulnerables a las inundaciones.

Los resultados nos permitieron identificar cuáles eran los usos del suelo de mayor afectación, así como las comunas y barrios que más implicados a recibir un gran impacto de las inundaciones, lo que nos permitió observar daños estructurales, viales afectaciones a la población, así como a infraestructura histórica del municipio, esta información nos permitió generar cartografía de la zona, así como algunas matrices de riesgo de los barrios con mayor afectación.

Concluyendo con los resultados más importantes los cuales son las propuestas generadas para combatir el cambio climático y las posibles soluciones

a el municipio para una correcta adaptación a el flujo contante del agua y el aumento de la misma así mismo como combatir las frecuentes inundaciones generando un mapa de las zonas que presentan mayor vulnerabilidad.

Palabras Clave: Inundaciones, SIG, Cartografía, MNDWI, Amenaza.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se vive un fuerte problema derivado del cambio climático las fuertes oleadas de calor han generado unos daños irreversibles en nuestras capas de hielo y directamente en océano por procesos de expansión térmica, el ascenso del nivel del mar es el proceso que más se está observando en las playas de todo el mundo ya que por culpa del deshielo ha aumentado de manera alarmante el volumen de agua global, este hecho afecta las costas ya que acaba directamente con el terreno y la amenaza constante de fuertes inundaciones.

Cartagena de indias municipio del departamento de Bolívar, no se queda atrás en cuanto a problemas derivados por el cambio climático y el ascenso del nivel del mar, trayendo consecuencias gracias a sus bajas elevaciones y susceptibles a inundaciones, rescatando que Cartagena es centro histórico del Colombia y se establece en uno de los lugares más turísticos, hay muchos lugares culturales e históricos que se pueden llegar a ver afectados por las fuertes inundaciones.

Este estudio nos permite salvaguardar las zonas que mayor amenaza tenga, así como explicarles los efectos destructivos y las maneras de cómo se puede evitar estos, la metodología es cuantitativa gracias a los resultados numéricos que pudimos obtener, usando los sistemas de información geográfica, imágenes satelitales, capas vectoriales, esto para generar mapas de vulnerabilidad y riesgo.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años, nos hemos vistos afectados por los efectos que provienen del cambio climático, gracias directamente a la emisión de gases de efecto invernadero incentivados por la cultura humana, esto generando una cadena devastadora que empieza con altas temperaturas y termina con el ascenso del nivel del mar, ya que contamos con un intermediario que es el derretimiento de los polos, esto afectando no solo los ecosistemas marinos, además de afectar la infraestructura y la vida humana costera (IPCC, 2021).

Se ha logrado observar, que Cartagena es una de las ciudades costeras de Colombia que vive en bastante peligro por diferentes hechos como: ascenso del nivel del mar, inundaciones urbanas, y el degrado de los ecosistemas marinos y costeros, así mismo la subida exponencial que ha tenido las zonas urbanas en lugares de baja altura, incrementa la exposición a algunos fenómenos meteorológicos extremos (INVEMAR, 2018). Entendiendo que es una ciudad que vive en constante amenaza ya que en los últimos años se han registrado una enorme cantidad de inundaciones que afectan no solo la economía si no la infraestructura local, esto nos da a entender que lo que sufre la ciudad de Cartagena no solo depende de impactos ambientales, sino que también se encuentra la mano del hombre y la falta de planificación territorial.

Como se dijo previamente la falta de planificación territorial nos deja en un nivel muy bajo ya que no se tiene información suficiente para poder tomar alguna

decisión crucial, ya que la falta de cartografía, mapas multipropósito, CRGD, etc. La falta de estos insumos deja a Cartagena en una línea muy pequeña ya que con la ausencia o desactualización de estos datos no se pueden tomar decisiones claras y eficaces para la correcta prevención, el uso de las SIG (Sistemas de Información Geográfica) es vital ya que se podría identificar zonas con peligro de inundación, cuáles son las zonas más vulnerables frente al ascenso del nivel del mar de Cartagena (Moser, 2014), la ausencia de este sistema geográfico evita que Cartagena pueda volverse resiliente ante estos hechos ya que no tiene claridad de las consecuencia que pueden llegar a afectar.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El estudio realizado por (Restrepo-Angel, Hernandez-Carrasco, & Ortiz-Royero, 2021) nos demuestra la importancia que le debemos dar a el tema del ascenso del nivel del mar, por los efectos del cambio climático ya que cada día el peligro por hundimiento de la playa por las crecientes mareas que atormentan no solo los habitantes si no la infraestructura Cartagenera que se considera como patrimonio cultural de nuestra humanidad y de nuestro país.

Esto nos da una serie de consecuencias, las cuales poco a poco aumentan de gravedad, en las que podemos encontrar que la ciudad de Cartagena sufra de tsunamis de gran magnitud y demasiado devastadores, esto trayendo afectaciones como las cuales son, destrucción de infraestructura, daño en carreteras, deterioro en el patrimonio cultural, así mismo como daños en los manglares en la vegetación y en algunos aminaes que son costeros.

Los beneficios que nos da el crear cartografía que ayude con la ubicación de zonas las cuales tengan mayor afectación, va generar una serie de confianza en las personas que habitan en la ciudad ya que estarían más preparados ante los hechos climáticos que pueden sufrir por parte del cambio climático y el fuerte ascenso del nivel del mar.

1.3. OBJETIVOS

ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar estrategias de resiliencia y adaptación al ascenso del nivel del mar en Cartagena mediante sistemas de información geográfica (SIG) y análisis geoespacial con el fin de mejorar la gestión de riesgo costero y la planificación territorial.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las zonas de vulnerabilidad frente al ascenso del nivel del mar utilizando las SIG (Sistemas Información Geográfica).
- Generar modelos digitales del terreno de las zonas costeras, a través de imágenes satelitales.
- Diseñar propuestas de adaptación y resiliencia asistidas por datos geoespaciales.

1.4. ESTADO DEL ARTE

Si hablamos de ascenso del nivel del mar, tenemos que hablar así mismo del cambio climático ya que es uno de los fenómenos que más influye en que poco a poco las mareas se apoderen de más territorios costeros. Según estudios realizados por el IPCC las causas principales de estos hechos son la gran expansión térmica de los océanos y el derretimiento de los glaciares y las capas de hielo, este estudio nos genera proyecciones, el cual nos permiten observar impactos en las zonas de expansión costera (IPCC, 2021).

Es de gran importancia el saber cómo defendernos en cuanto a las consecuencias que derivan del ascenso del nivel del mar, el profesor Mark Pelling

dijo “la resiliencia urbana implica la capacidad de las ciudades para resistir, adaptarse y transformarse frente a perturbaciones climáticas (M., 2011)”;

Lo que el profesor y conferencista nos trataba de comunicar es que el ascenso del nivel del mar claramente es un problema el cual podemos darle manejo con diferentes actitudes que debemos tomar, resaltando que en vez de verlo como un estilo de problemática, lograr darle cierto manejo, para tomar una posición de resiliencia o adaptación sobre este hecho.

Por otra parte, lo vulnerable que se encuentran las ciudades costeras en cuanto a los sucesos del cambio climático es alarmante, ya que gracias al Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andreis (INVEMAR), se pudo identificar que en Cartagena el ascenso del nivel del mar es un hecho, y aunque no todo se le debe al cambio climático ya que también entran en juego algunos otros factores como lo pueden llegar a ser la intrusión salina y la erosión del suelo ya que debido a su ubicación costera se pueden observar algunas extensiones urbanas muy pegadas a la zona costera, o a cuerpos de agua (INVAMAR, 2014).

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. Marco Teórico

2.1.1. Cambio Climático

Desde hace mucho tiempo el saber cómo se comporta el clima ha sido un desafío para las personas, el entender el comportamiento de las estaciones, tormentas es un gran dilema, y con el constante cambio del clima gracias a los diversos acontecimientos que generan variaciones en el clima global, en este contexto, damos a entender que el cambio climático es una alteración en toda la tierra, esto afectando directamente ecosistemas como lo son glaciares, costas, afectaciones directas en las lluvias y la temperatura global (IPCC, 2021).

En relación con lo anterior, los gases de efecto invernadero son la principal fuente que la tierra sufra del calentamiento global, ya que la fuerte emisión de CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano) y N₂O (óxido nitroso); el fuerte aumento de esos gases en la atmosfera, generando mayormente por la quema de combustibles fósiles, siendo la actividad humana una de las principales fuentes, ya que la actividades de empresas agrícolas, deforestación, creación de energías no renovables, quema de gasolina en vehículos de combustión, generan una cantidad inmensa de gases que terminan en el cielo (IPCC, 2021).

De acuerdo con lo antes comentado, los efectos varían dependiendo el ecosistema, aunque algunos de estos traen consecuencias en cadena como el derretimiento de los glaciares que genera el aumento de la masa de agua continental, así mismo las fuertes temperaturas generan sequias en zonas de alta

vegetación y fuertes incendios en zonas como paramos o de climas generalmente fríos, siendo un daño para nosotros mismos y para la biodiversidad.

2.1.2. Asenso del nivel del mar

Por otra parte, el ascenso del nivel del mar es el hecho que genera que la masa acuática del planeta crezca sin control esto creando un mayor volumen de agua en las costas y en la superficie terrestre en general, de acuerdo con, (IPCC, 2021), se establece que el nivel medio del agua ha aumentado 0.20m entre 1901 y 2018.

Así mismo, la expansión térmica y el derretimiento de los glaciares son principalmente los hechos que causan este impacto, los cuales se crean gracias al calentamiento global, siendo el aumento de la temperatura el mayor detonante, aunque una no tiene nada que ver con la otra, ya que la expansión térmica es aquella que al aumentar la temperatura del agua genera una reacción que provoca que el fluido aumente su tamaño ocupando una mayor cantidad de espacio; ya que la masa oceánica ha absorbido una gran cantidad de energía gracias a los comportamientos de los humanos, esto creando un feroz aumento en la temperatura (IPCC, 2021).

De igual manera, los grandes macizos de hielo también son importantes al momento de hablar del ascenso del mar , ya que las altas temperaturas generan que los glaciares pierdan mayor cantidad de masa que la que pueden recuperar en sus nevadas, así mismo hay que resaltar la diferencia entre los glaciares y las capas de hielo terrestres, ya que el hielo que se encuentra flotando en los océanos no tiene el mismo impacto que tiene el que se derrite estando incorporado en la tierra ya que este viaja directamente al océano (IPCC, 2021).

En este contexto, el aumento del nivel del mar es una problemática inminente para las zonas costeras, con mayor impacto en las que están a una altitud más baja, ya que se encuentran con una mayor probabilidad de sufrir impactos más severos a tormentas, inundación y olas extremas; aunque estos impactos pueden variar dependiendo de la ubicación geográfica (IPCC, 2021).

2.1.3. Dinámica y vulnerabilidad de zonas costeras

Comprender los sistemas costeros es un proceso laborioso ya que estos ecosistemas son completamente dinámicos y viven en constante cambio, esto debido a factores como lo son sedimentos, aire, olas que generan que viva en cambios frecuentes, así mismo el estudiar y entender la dinámica que se presenta nos permite evaluar que tan vulnerable esa zona costera en cuanto al ascenso del nivel del mar, y que tanta capacidad de respuesta tiene esta misma en cuanto a las diversas situaciones (McFadden, Nicholls, & Edmund, 2006).

Una de las situaciones más frecuentes son las inundaciones ya que las fuertes tormentas, tsunamis y demás hechos meteorológicos generan un atasco en la mayoría de drenajes de zonas costeras, aunque la vulnerabilidad de estos depende de que tan bajo se encuentren el terreno, dándonos a entender que los impactos más grandes se lo llevan las playas y no tanto las ciudad, siendo el estudio de esto primordial para conocer las amenazas y poder determinar los elementos están mayormente expuestos, así mismo la inflación urbana como lo es la construcción de viviendas, carreteras, turismo aumenta la cantidad de personas que se encuentran vulnerables, así mismo el intervenir las playas para crear infraestructuras, reducen la cantidad de playa evitando que la misma tierra logre adaptarse naturalmente (McFadden, Nicholls, & Edmund, 2006).

2.1.4. Riesgo Climático

No obstante, la amenaza climática son aquellos cambios de clima que dañan directamente las poblaciones afectadas, estos fenómenos climáticos como lo son las oleadas de calor, tsunamis, lluvias fuertes, grandes sequías, etc. Es importante resaltar que las ciudades al contener infraestructura, individuos, actividades económicas, pueden sufrir consecuencias más devastadoras. (Rosenzweig, y otros, 2018).

El termino de riesgo climático precisamente no necesita que se genere alguna amenaza, ya que es dependiente de la correlación que existen entre amenazas exposición y vulnerabilidad. En este contexto, la exposición nos nombra actividades como el turismo, la biodiversidad, infraestructura, que se encuentran posicionados en zonas de mayor amenaza (Rosenzweig, y otros, 2018).

Así mismo, el termino vulnerabilidad es el que nos da a entender que tan susceptible es una población a sufrir daños, (Rosenzweig, y otros, 2018); los autores logran enfatizar que hay una gran desigualdad socio económica, dándonos a entender que se puede vivir una misma amenaza desde dos miradas distintas ya que algunas personas tienen para acceder a viviendas más seguras e información actualizada y detallada.

La capacidad de adaptación es una aptitud que se puede mejorar generando tácticas como la actualización del ordenamiento territorial, la pronosticación de alertas tempranas para un desalojo completo de la población combinándolo con un buen sistema de drenaje, para tener una evacuación precoz del agua en estos incidentes.

2.1.5. Resiliencia frente al cambio climático

En el contexto de resiliencia, se puede entender que es la capacidad que tiene alguna población para lograr mantener su estabilidad y seguir operando frente a las amenazas o alteraciones, adaptándole el ámbito del cambio climático nos da a entender que una ciudad no solamente debe aguantar algún evento meteorológico, sino que también debe generar algún tipo de solución y mecanismos que le permitan dar una buena respuesta y recuperarse después del evento (M., 2011).

Sin embargo, en las zonas costeras la resiliencia debe ser un tema de vital seriedad ya que estos viven en constante amenaza de erosión, inundaciones, tormentas y demás, desde el punto de vista de (M., 2011), la resiliencia no solamente se debe centrar en a construir defensas físicas, aunque el autor resalta que es importante, le da más necesidad a como la sociedad y la comunidad logran organizarse para enfrentar estos riesgos.

Así mismo la infraestructura también es importante mencionarla ya que el incluir sistemas de drenaje más eficientes, viviendas con mayor resistencia, un sistema de alertas en toda la ciudad, aunque la resiliencia se ve más si se combinan y se logra equilibrar entre la parte social y la parte infraestructural (M., 2011).

2.1.6. SIG (sistemas de información geográfica)

Las SIG o sistemas de información geográfica son una serie de base de datos que sirven para almacenar información con el fin de analizarla y representarla gráficamente para poder entender algunos hechos que suceden en el territorio. El

libro (Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2015), nos plantea que Las SIG no solamente nos benefician en la creación de cartografía, sino que también en la toma de decisiones en cuanto al ordenamiento territorial, gracias a la gran fuente de datos y a las relaciones geoespaciales.

Uno de los métodos más usados es el análisis geoespacial el cual combinando cierta cantidad de datos como. Localización, cambios del territorio, análisis espacial, nos permite analizar el comportamiento de la tierra sin la necesidad de ir directamente al lugar, gracias a esto se puede interpolar, cartografiar, modelar, entre otras, características que nos permiten encontrar zonas con una afectación amplia (Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2015).

Uno de los aspectos más importantes de las SIG no es solamente el visualizar información, sino que también deben ser principales en la toma de decisiones, ya que los sistemas de información geográfica nos brindan los datos suficientes los cuales podemos convertir en posibilidades que ayuden con la mitigación de daños y amenazas (Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2015).

2.2. Marco conceptual

Cambio Climático: El cambio climático es la modificación de los sistemas climáticos, el cual se realiza por la fuerte elevación de la temperatura, mayor índice de tormentas, inundaciones y sequías, generando una inestabilidad climática, esto causado por el aumento en la emisión de gases de efecto invernadero como la mayoría de actividades las cuales implican el uso de combustibles fósiles, dándonos

a entender que el ser humano es el principal implicado en el cambio climático (IPCC, 2021).

Nivel del Mar: Se entiende por nivel del mar a la altura oceánica, la cual puede tener distintos cambios dependiendo de ciertas circunstancias como lo son el aumento de su temperatura lo que realiza un evento llamado expansión térmica, creando una variación en el nivel medio del mar, así mismo el derretimiento de los polos al aumentar la masa oceánica global también es causante que el nivel del mar este sujeto a cambios constantes (IPCC, 2021).

Zonas Costeras: Las zonas costeras son un paso de océano a tierra o viceversa, y a diferencias de lo que muchos piensan no solamente es un pedazo de playa, ya que las zonas costeras son zonas oceanográficas y geológicas verdaderamente complejas ya que estas sufren un clima bastante dinámico generado climas cambiantes, además de ser el primer punto de referencias para ubicar el nivel del mar (Vernette, Correa, & Bernal, 2012).

Inundaciones Costeras: Las inundaciones costeras son acontecimientos donde la tierra costera o la playa es parcialmente tapada por el agua oceánica, esto principalmente por el aumento del nivel del mar, fuertes oleajes, aumento de temperatura o actividad submarina, aunque la amenaza de inundaciones no solo dependa del aumento del nivel del mar, el hecho de que este aumente genera una amenaza más fuerte e inundaciones más grandes (Vernette, Correa, & Bernal, 2012).

Resiliencia: Es la capacidad que puede tener una población para enfrentar una adversidad y generar una adaptación a dicho caso, en el ámbito del cambio climático es la forma en como una ciudad puede adaptarse y lograr luchar contra

los fuertes cambios generados por las inundaciones y el aumento del nivel del mar (M., 2011).

2.3. Marco Legal

La ley 388 de 1997 establece el ordenamiento territorial que debe tener un municipio y en sus principales objetivos está el generara una correcta prevención de desastres naturales, así mismo como el correcto uso del suelo, y una exacta preservación del patrimonio cultural y natural

Decreto 1807 de 2014 establece la necesidad de incorporar escalas para mejorar la calidad de los detalles en el estudio de la gestión del riesgo, antes de realizar alguna planificación territorial, el articulo 9 nos explica los insumos mínimos que se necesitan al momento de hablar de inundaciones para determinar las zonas de mayor afectación (Colombia, 2014).

.

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El presente estudio se desarrolla con una metodología de investigación no experimental, cuantitativa, ya que en tomamos datos los cuales ya eran existentes y nos basamos en eso para generar los mapas de riesgo sin llegar a alterarlos o cambiarlos.

La investigación tubo un enfoque cuantitativo, ya que se emplearon datos medibles, que eran representados como, elevaciones, distancias y de más, esto ayudado por las herramientas SIG, el uso de cartografía existente de (Colombia en mapas, Alaska Vertex, EarthExplorer, MIDAS), descargándolas y procesándolas en herramientas SIG como lo es el software de código abierto Qgis para la creación de mapas y herramientas como Excel para la elaboración de tablas y matrices

El estudio fue de tipo descriptivo, ya que me permitió recrear las formas del territorio que representan diferentes niveles de amenaza, vulnerabilidad y riesgo frente a las inundaciones costeras, para esto se usó un análisis de teledetección el cual es el MNDWI, que nos permite observar la variación de pixeles de tierra y agua en imágenes satelitales.

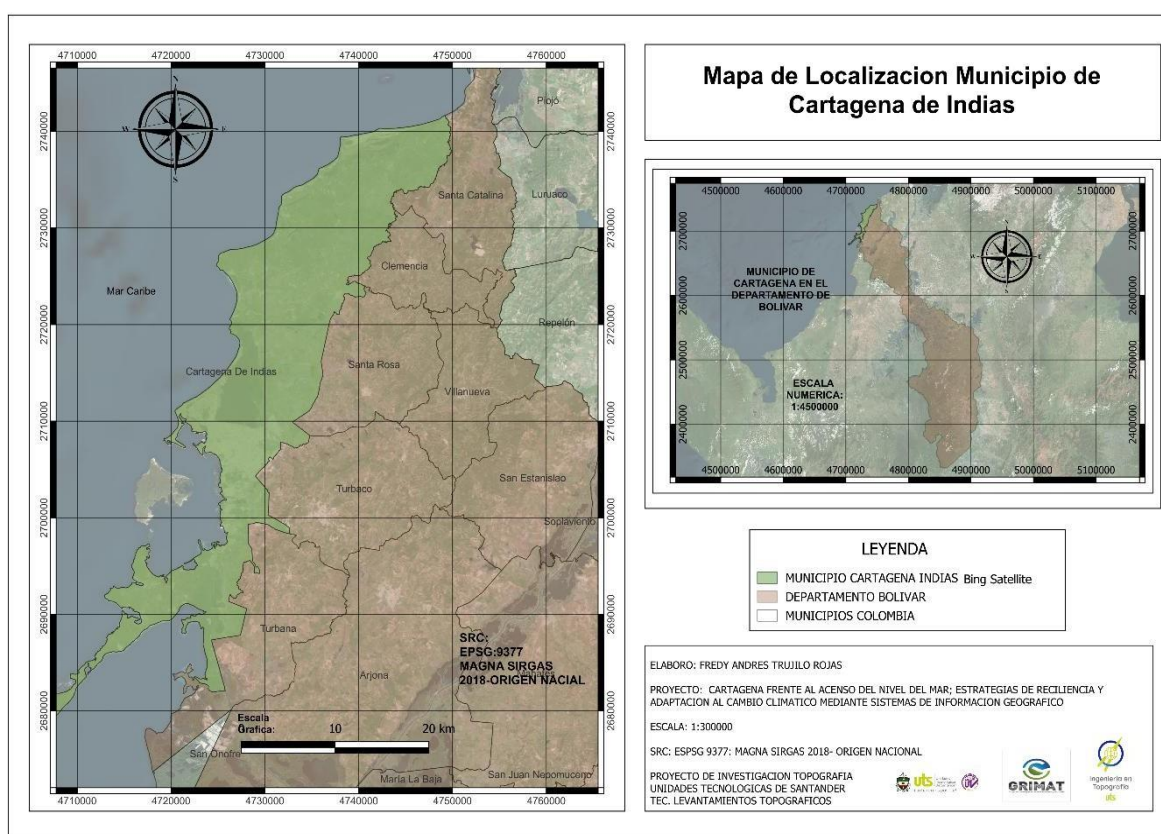
El procedimiento de la investigación tuvo en cuenta la revisión de bibliografía, datos, algunos países costeros que ya están buscando soluciones, descarga de capas y de información de Cartagena, generar cartografía temática, buscar zonas vulnerables y proponer cambio y adaptación.

4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

4.1. UBICAR Y CARTOGRAFIAR

4.1.1. Ubicar a Cartagena de indias

Figura 1. Mapa de ubicación del municipio de Cartagena de indias



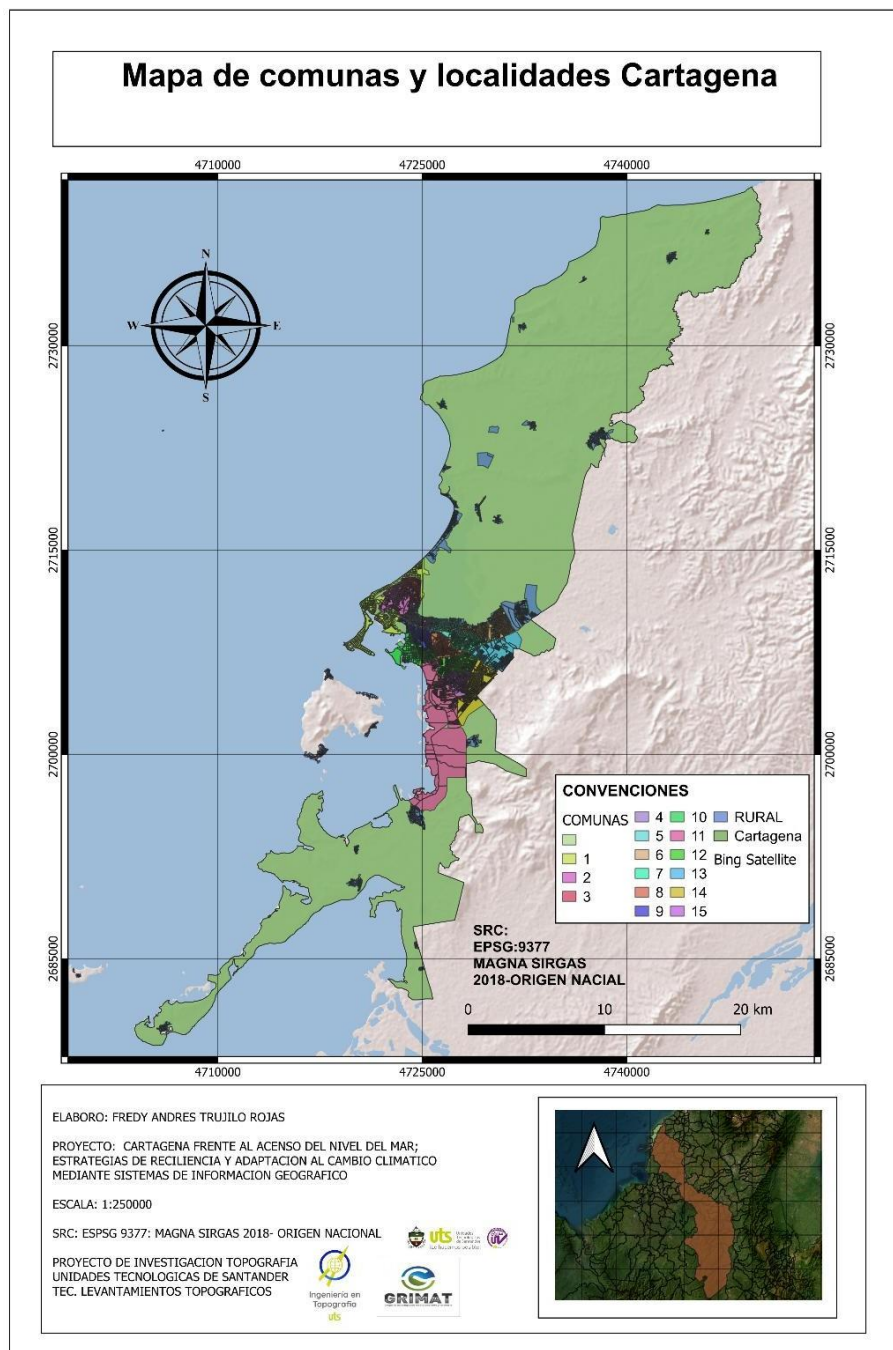
Fuente: Autor

ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

Figura 2. Mapa de las comunas y localidades el municipio de Cartagena



Fuente: Autor

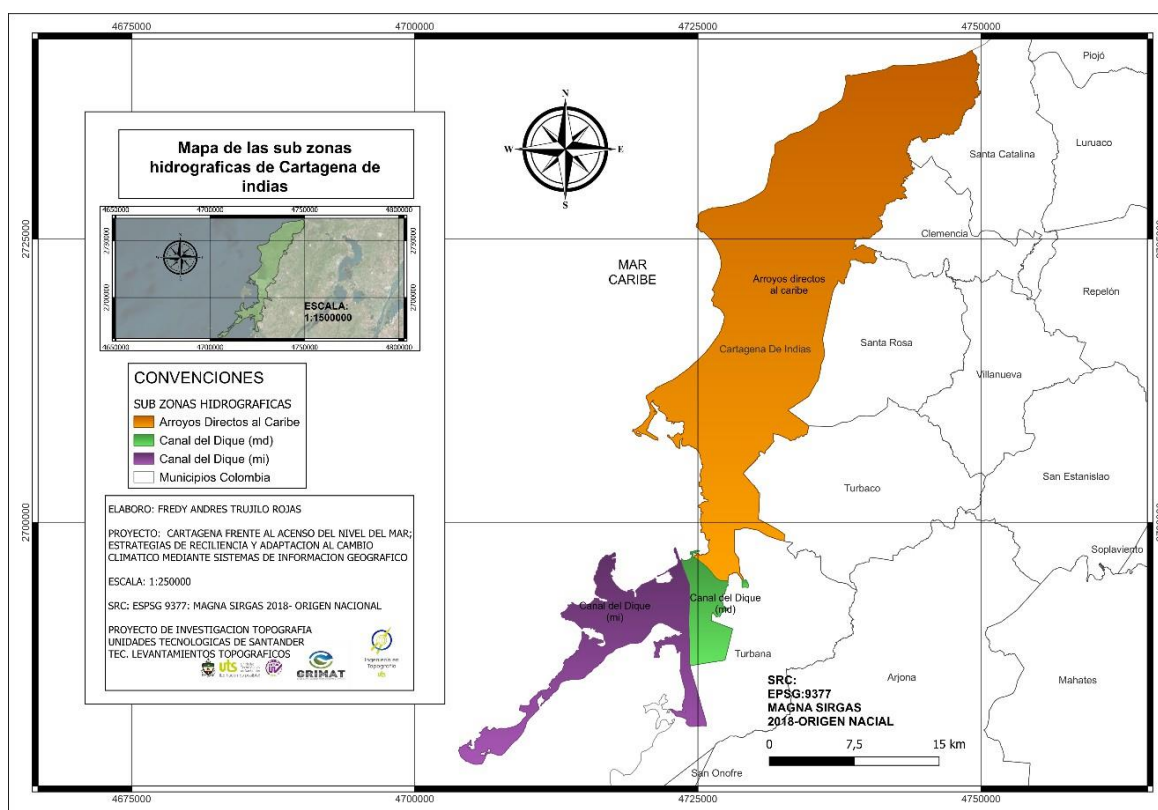
ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

El municipio de Cartagena ubicado al norte del país, es la capital del departamento de Bolívar, este cuenta con más de 200 barrios, 3 localidades y 15 comunas, entre ellos encontramos que algunos barrios de la comuna rural, algunos de la comuna 1, 10, 11, los cuales son afectados por el aumento del nivel del mar y la pérdida de tierra gracias al aumento del mismo.

Figura 3. Mapa de sub zonas hidrográficas del municipio de Cartagena de indias



Fuente: Autor

Se logra identificar que su gran mayoría del territorio drenan en el mar caribe, esto nos permite identificar como se organiza Cartagena en cuanto a drenaje,

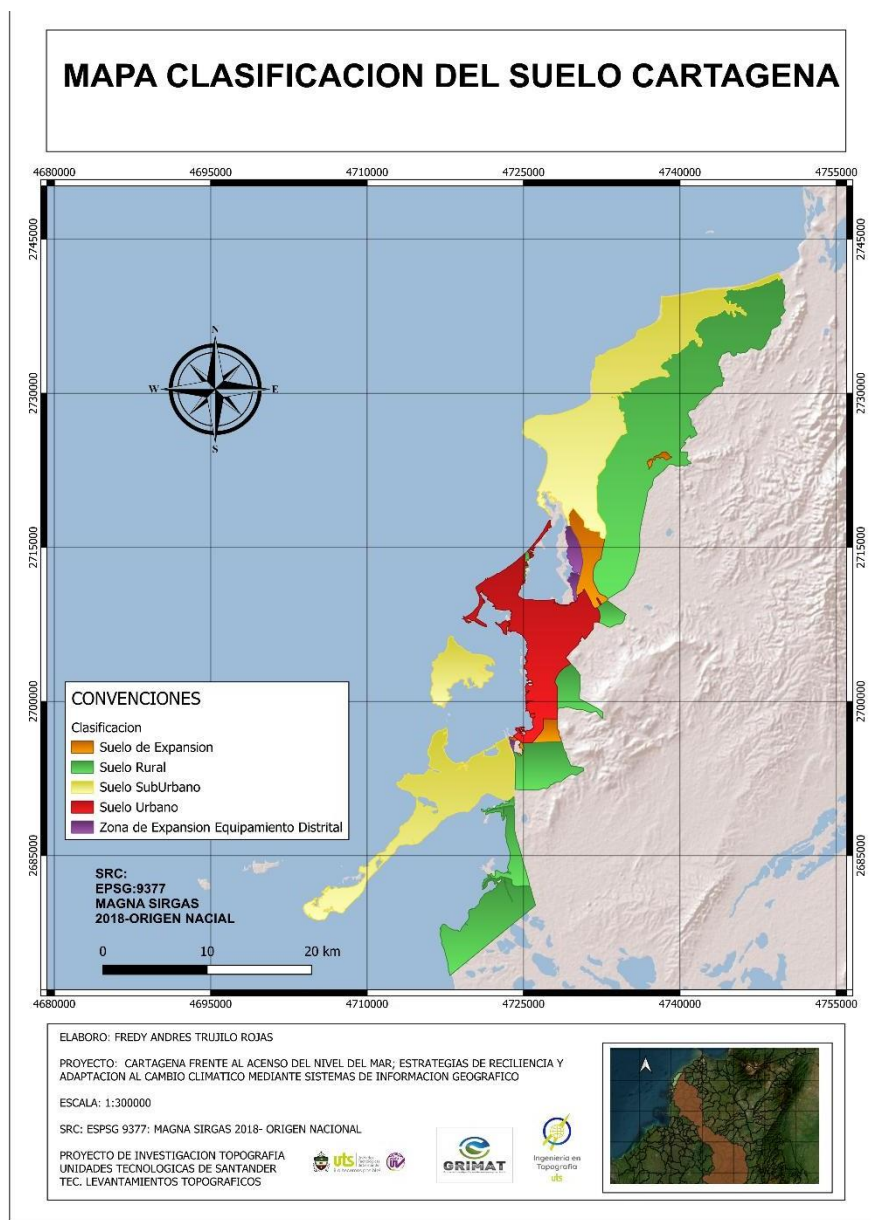
ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

permitiéndonos identificar tanto por donde entraría el agua en caso de inundaciones, como por donde se va drenar el agua.

Figura 4. Mapa de clasificación del suelo de Cartagena



Fuente: Autor

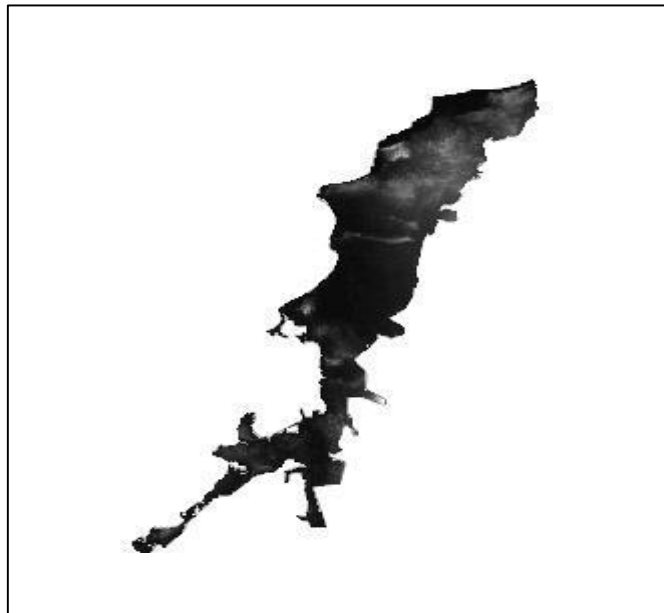
ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

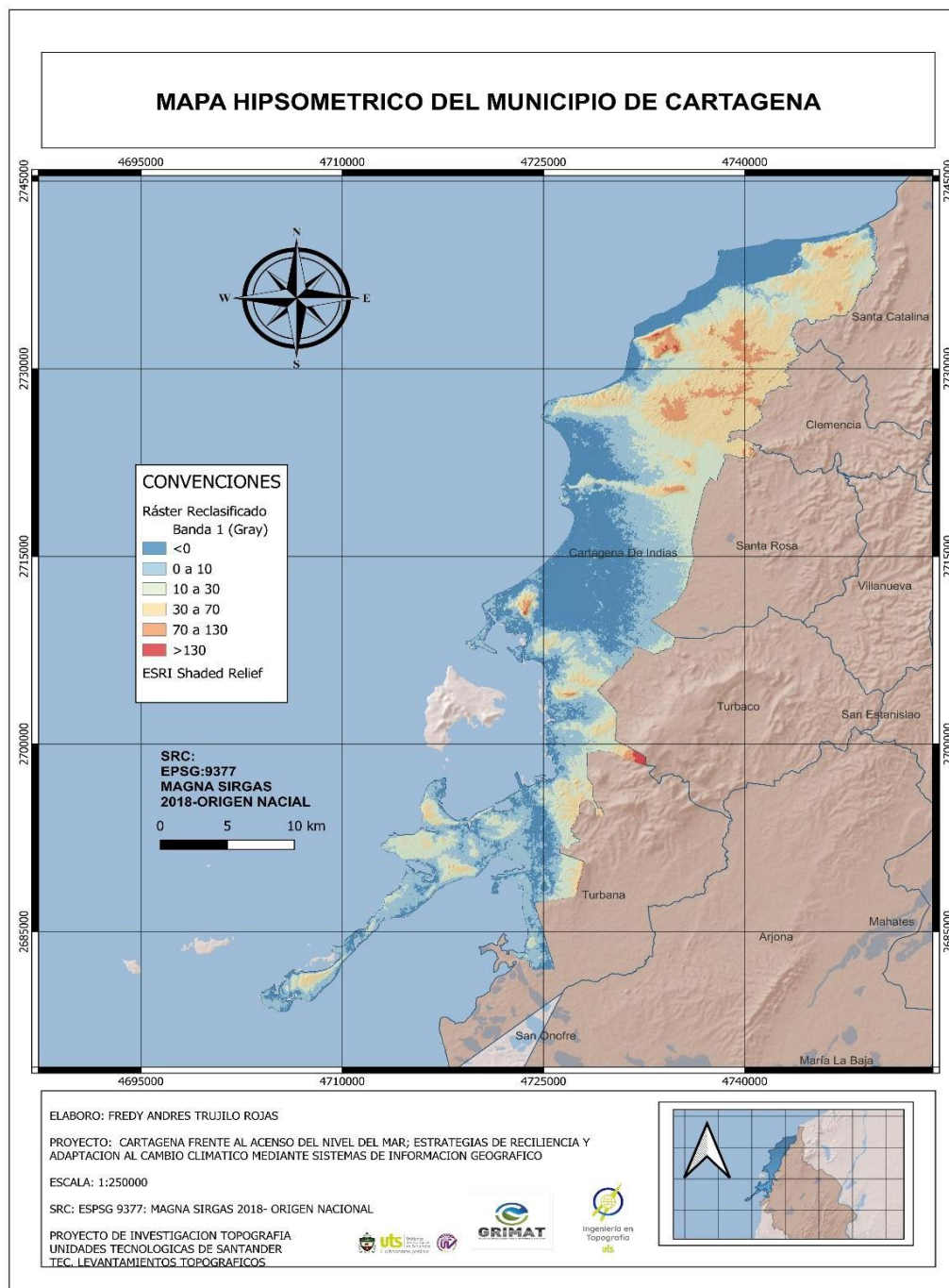
En el mapa se puede observar que la zona de mayor área es la rural y es la que más alejada esta del mar, así mismo podemos lograr ver que la zonas urbanas y sub urbanas son las que predominan en la conexión con la playa, esto siendo un problema ya que el ascenso del nivel del mar atenta directamente con los lugares donde mayor se concentra la población, esto dando a entender que el ascenso del nivel del mar dañaría directamente infraestructura, carreteras y demás, igual manera la zona morada o de expansión de equipamiento distrital nos da a conocer que se expande en una parte en la cual hay playa, entendiendo que esta infraestructura distrital se podrían ver afectadas en un futuro.

Figura 5. Modelo digital de elevación municipio Cartagena



Fuente: Alaska Vertex

Figura 6. Mapa hipsométrico del municipio de Cartagena



Fuente: Autor

ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

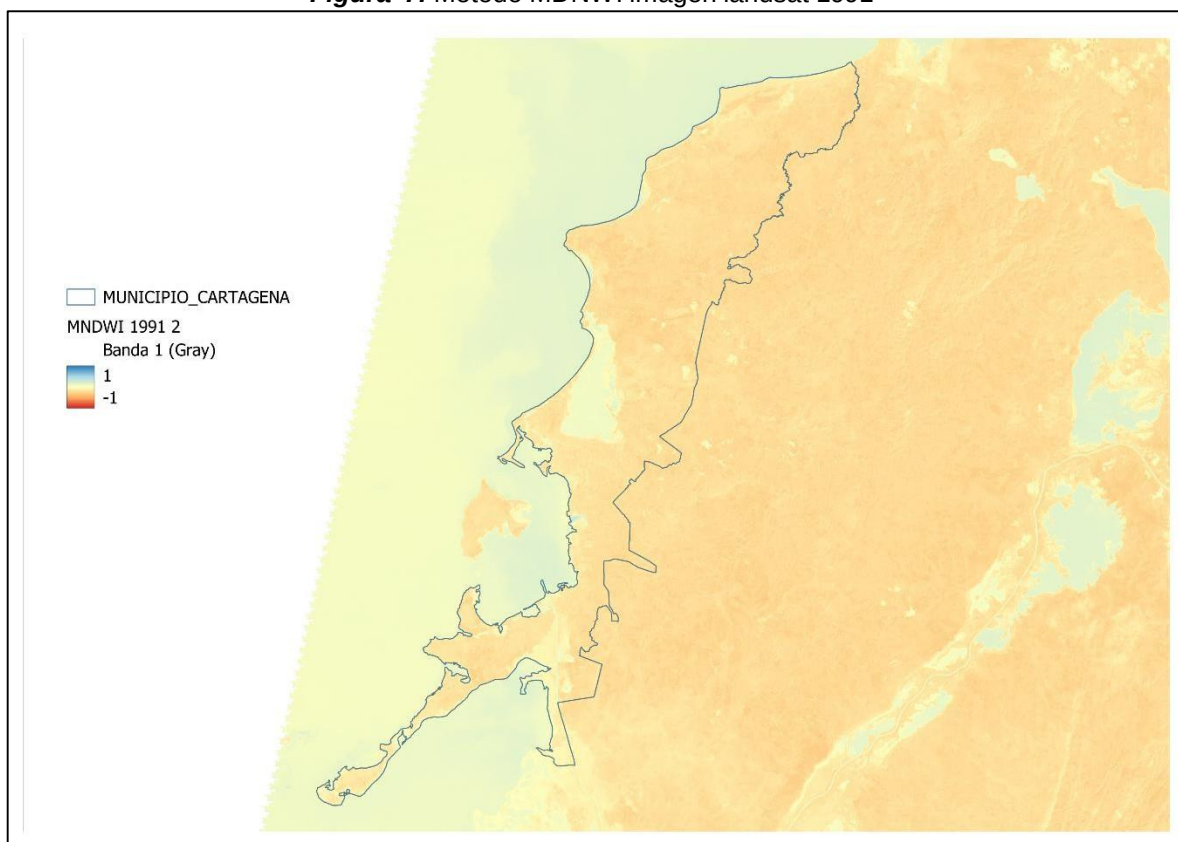
APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

Podemos ver que el municipio de Cartagena de indias se establece entre cotas negativas y va hasta los 130 metros sobre el nivel del mar, el motivo de que hayan cotas negativas es que hay algunas ciénagas y la gran parte de la costa, la cuales se logran ubicar por debajo del nivel del mar, de igual manera el que la mayoría de la ciudad sea por debajo de cero es peligroso en cuanto al aumento de la marea ya que esto provocaría que esa cota siga disminuyendo con el pasar de los años, igual manera observamos que pocos lugares son los que están en rojo o tiene más de 130 metros sobre el nivel del mar y se puede distinguir de estas zonas que están bastante lejanas de la costa.

4.1.2. Análisis temporal en la costa del municipio de Cartagena

Revisando en el catálogo de imágenes satelitales de los satélites Landsat, se logran identificar imágenes desde 1991 hasta el año 2026, esto con el fin de lograr definir cuanta tierra a perdido Cartagena a partir de los años gracias a un método conocido como el MNDWI, y así determinar zonas de mayor impacto por la problemática del ascenso del nivel del mar.

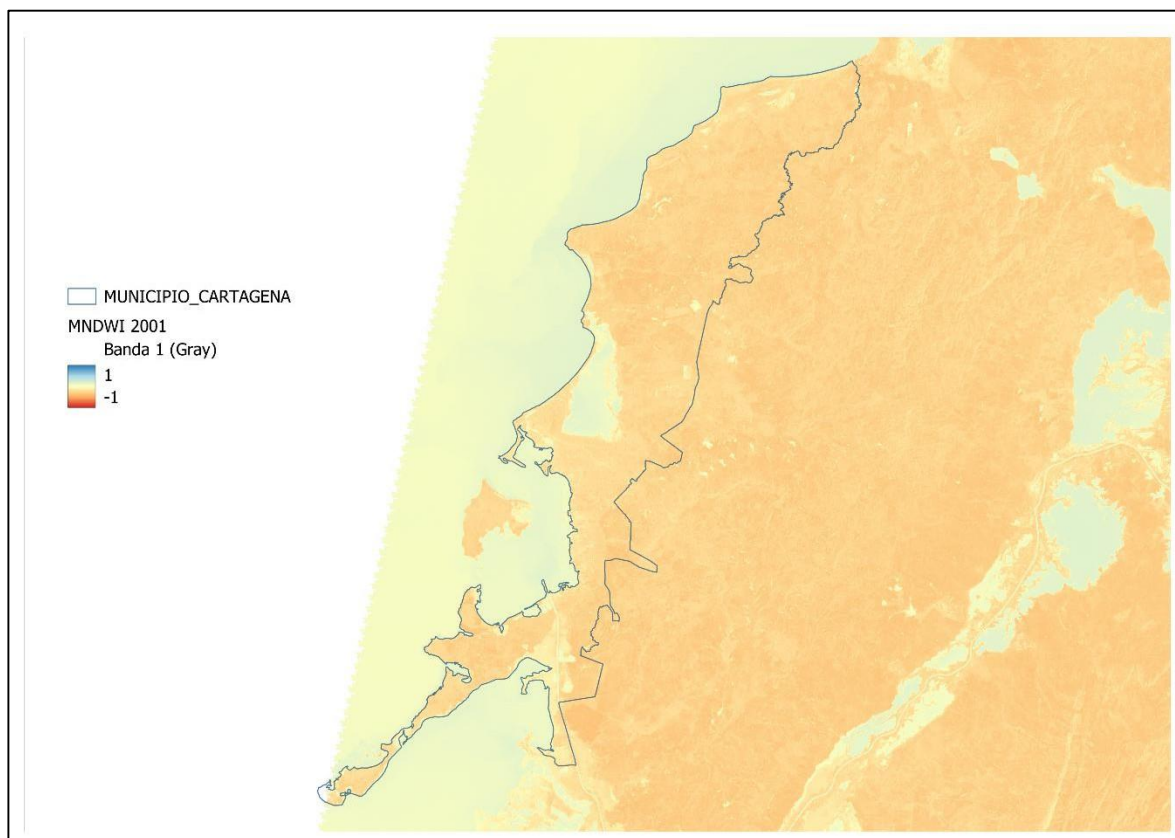
Figura 7. Método MDNWI imagen landsat 1991



Fuente: Autor

En la figura se logra observar un método el cual es el índice de diferencia normalizada del agua (MDNWI), este método nos permite diferenciar las superficies terrestres de las de agua, gracias a su cálculo usado por la banda 2 y banda 5, siendo la primera imagen a comparar se aprecia una gran tonalidad naranja tanto en la zona costera como en la demás área, ya que las manchas azules son débiles y de un azul posiblemente con valor 0 que da a entender que ese pixel está en transformación de tierra a agua.

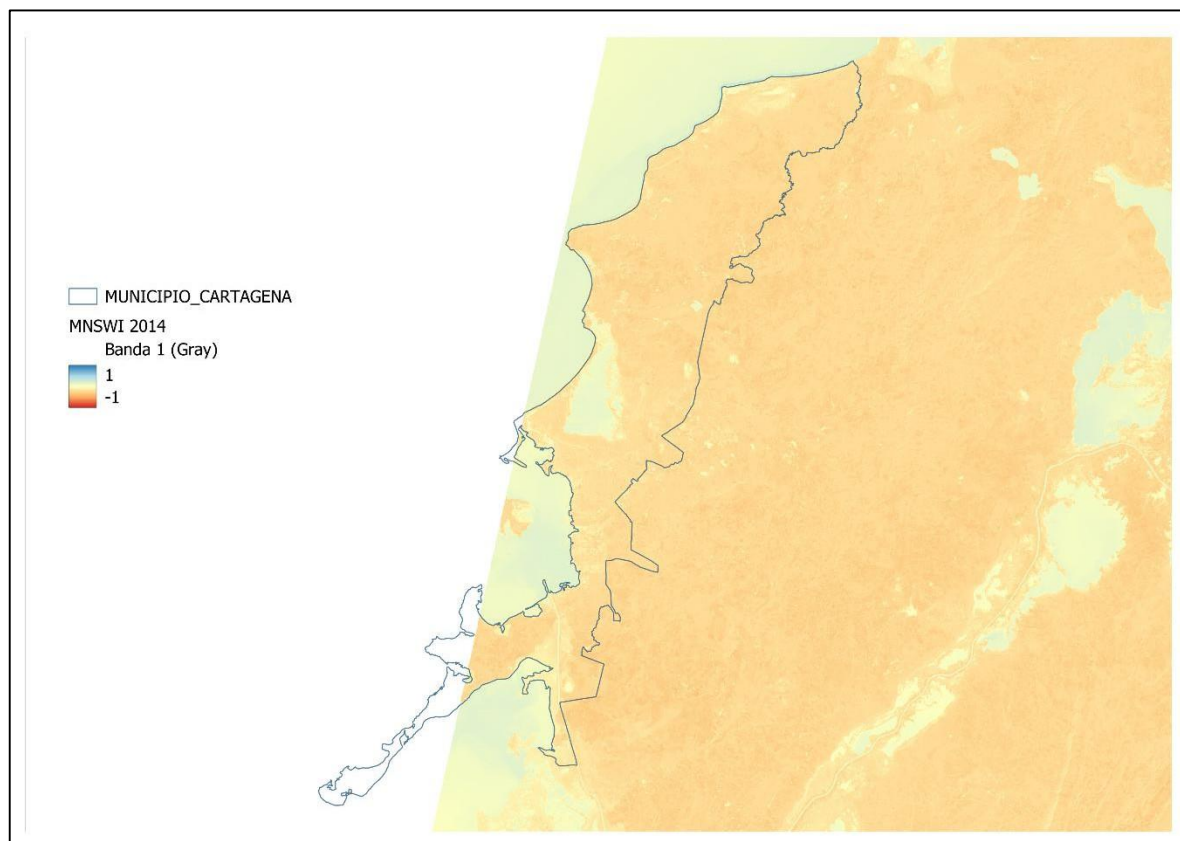
Figura 8. Método MDNWII imagen landsat 5 2001



Fuente: Autor

Comparándola con la de 1991 y usando las mismas bandas de estudio ya que son el mismo satélite landast 5, podemos observar que algunos pixeles de la parte del agua han aumentado, aunque no es de gran manera si son a mencionar, ya que el azul aumenta y se oscurece un poco más, dándonos a entender que la marea han aumentado, esto prolongando el ascenso al nivel del mar gracias a las zonas de bajas alturas.

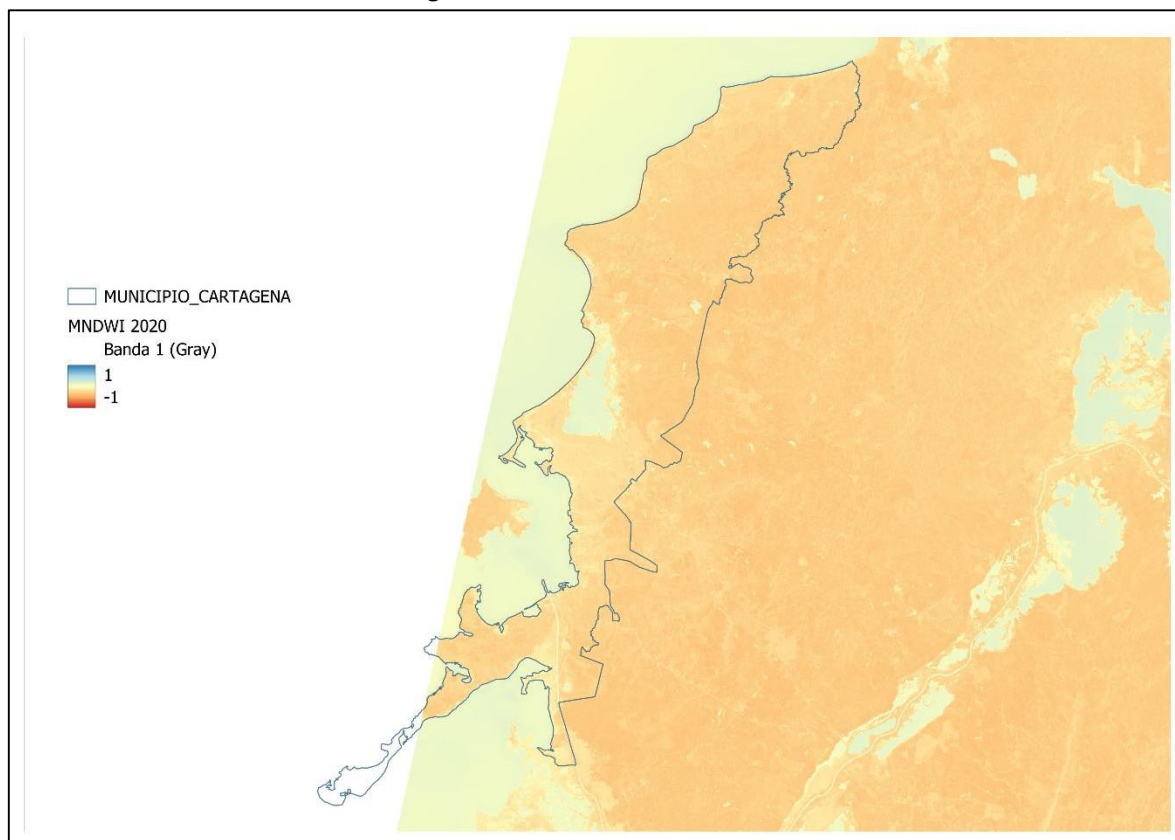
Figura 9. Método MDNWI landsat 8 2014



Fuente: Autor

En esta figura ya entramos a el satélite del landsat 8, gracias a esto las bandas de estudio cambian, ya que en la calculadora usamos la banda 3 y la banda 6, en cuanto a comparación con la del año 2014 podemos observar que los pixeles de agua aumentan significativamente, esto enseñándonos los efectos acumulativos que genera el ascenso del nivel del mar y como poco a poco se pierde más tierra.

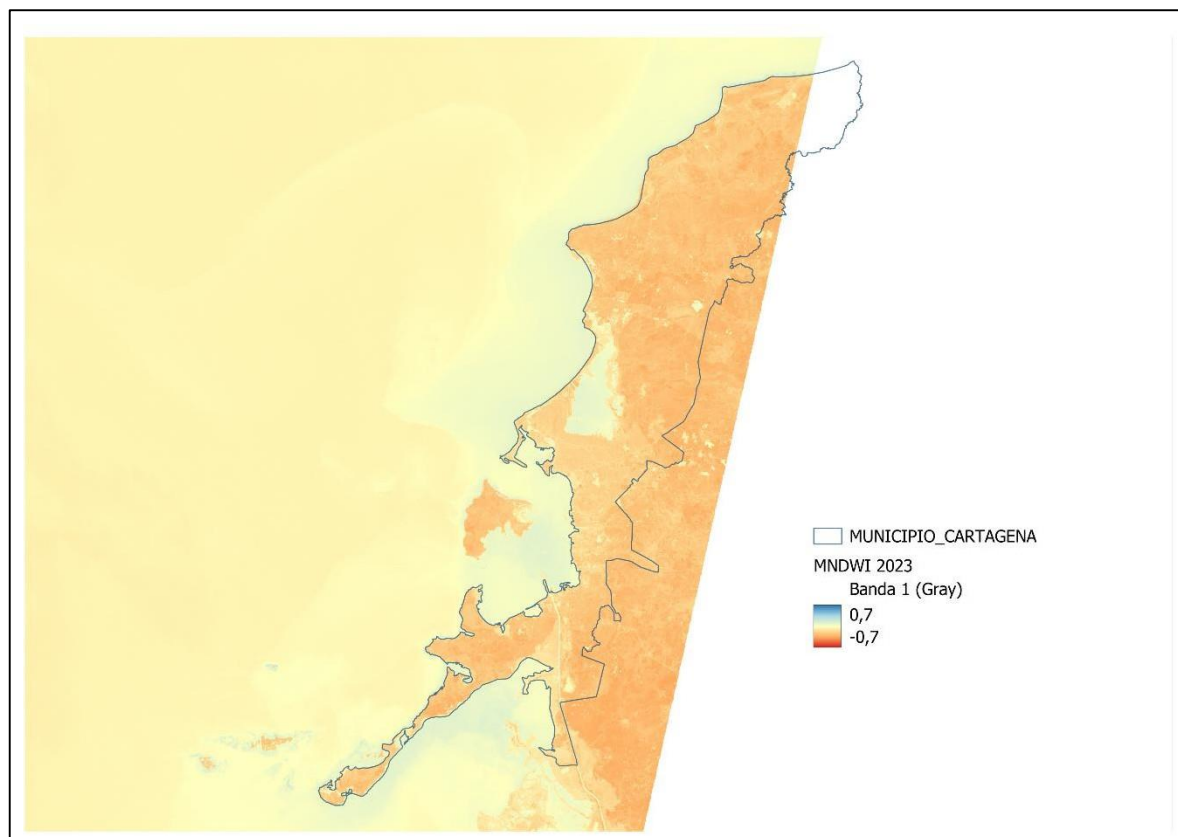
Figura 10. Método MDNWI landsat 8 2020



Fuente: Autor

Poco a poco se puede observar cómo los pixeles no solamente se tornan más oscuros, sino que también tornan a aumentar de manera significativa y notoria, cada vez y con el paso de los años se logra evidenciar como los efectos del ascenso del nivel del mar se acumulan, consumiendo de manera eficaz las playas.

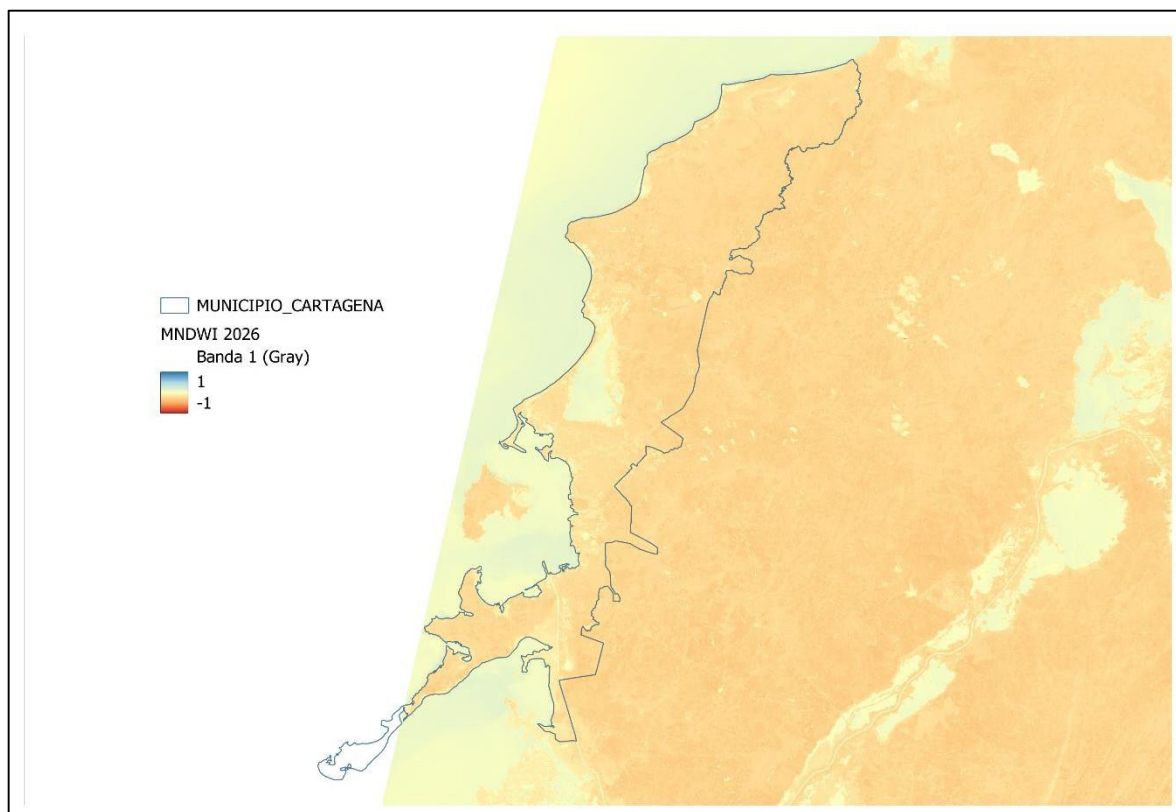
Figura 11. Método MNDWI landsat 8 2023



Fuente: Autor

Del año 2020 al 2023 el cambio ya es más notorio ya que muchos de los pixeles de terreno costero se pierden y suben a valores entre 0 y mayores que cero, esto llevando a que la línea de costa tenga modificación en cuanto a pérdida de tierra, dándonos a entender la mala respuesta de las zonas muy bajas y el ascenso a el nivel del mar acelerado.

Figura 12. Método MNDWI landsat 8 2026



Fuente: Autor

Esta es la última imagen analizada y es la del presente año, podemos observar que los pixeles acumulados han hecho que la línea de costa renuncie a parte de tierra con el pasar de los años y claramente se advierte de una continuación en los procesos de pérdida de tierra por parte de las playas y el aumento acelerado del nivel del mar.

La evolución de las imágenes nos permite observar cómo se acumulan poco a poco los pixeles del agua, y como continuamente se lograba apreciar como la tierra perdían pixeles, modificando la línea costera y la profundidad del mar.

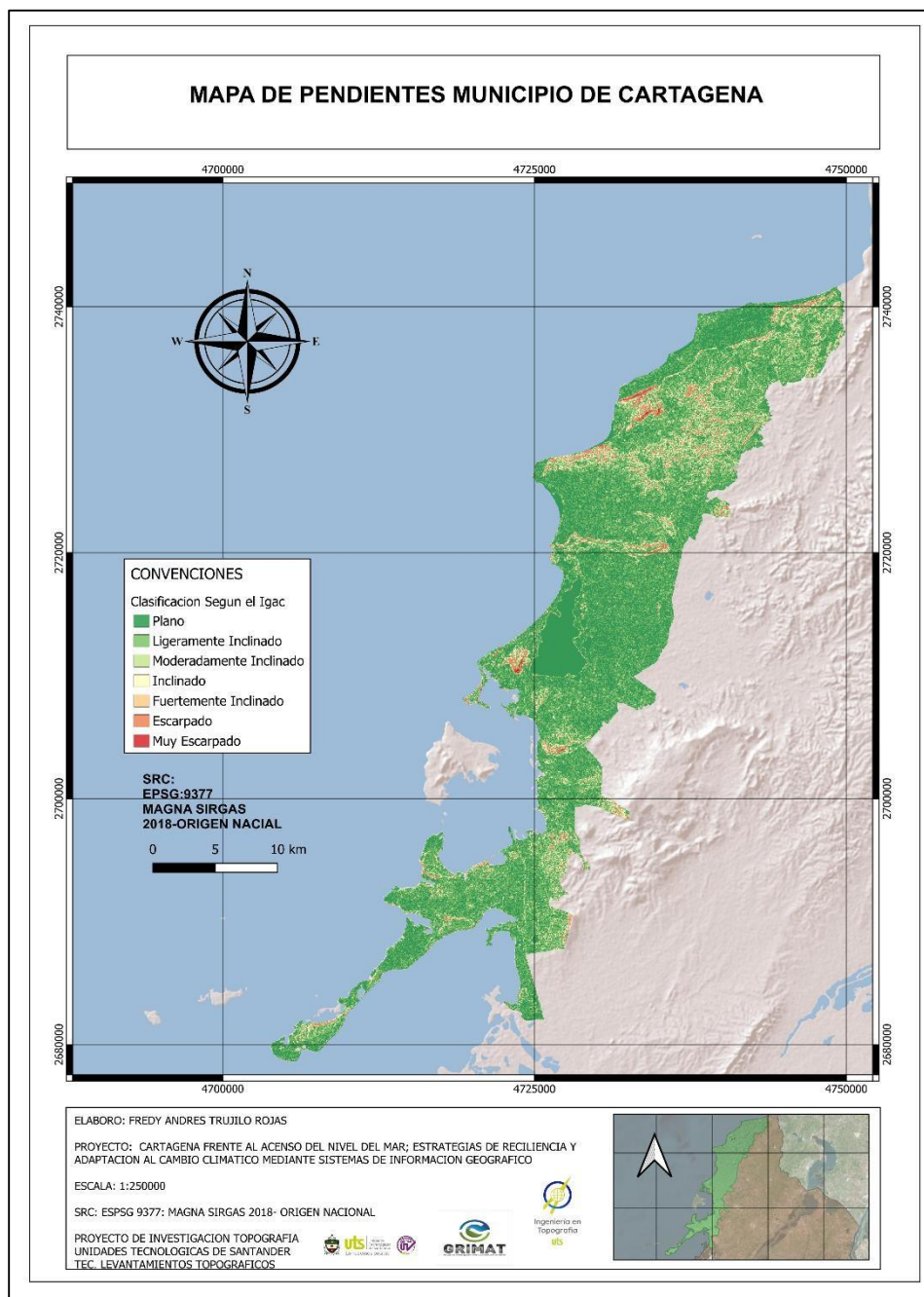
ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

4.1.3. Análisis de inundaciones por el ascenso del nivel del mar

Figura 13. Mapa de pendientes Clasificado según el IGAC



Fuente: Autor

ELABORADO POR:
Docencia

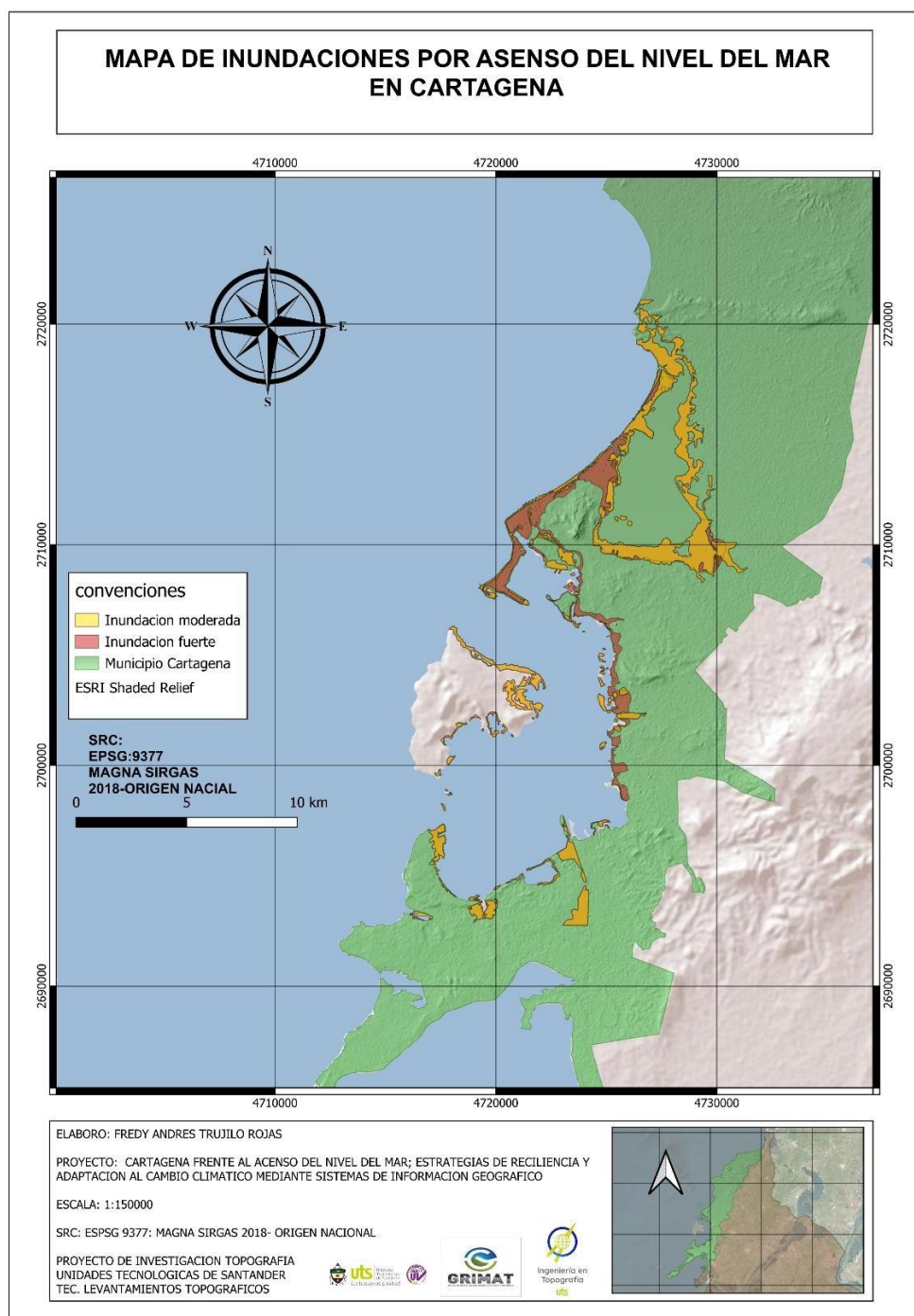
REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

En el mapa de pendientes se logra observar que predominan las zonas planas a inclinado y son muy pocas las zonas escarpadas, esto demostrando que Cartagena está totalmente pegada al nivel del mar y son pocas las zonas de gran altitud.

Las áreas de poco porcentaje de pendiente presentan una fuerte susceptibilidad a procesos como inundaciones, y a casos ambientales como el ascenso al nivel del mar ya que pierden con más facilidad sus playas por el aumento descomunal de la marea. De igual manera el estar en zonas bajas aumenta la temperatura y la humedad generando hechos como la expansión térmica, que aumenta la amenaza de inundaciones.

Figura 14. Mapa de inundaciones por aumento del nivel del mar según el INVEMAR



Fuente: Autor

ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

Se evidencia que las zonas costeras son las únicas que tienen amenaza directa a inundaciones por el ascenso del nivel del mar, ya que son la conexión entre playa y mar, al ser casi todo plano y estar a una misma altitud, los efectos pueden verse más implicado y pueden generar más daño, observando que las partes más alejadas de las costas no sufren, aunque tengan la misma altitud.

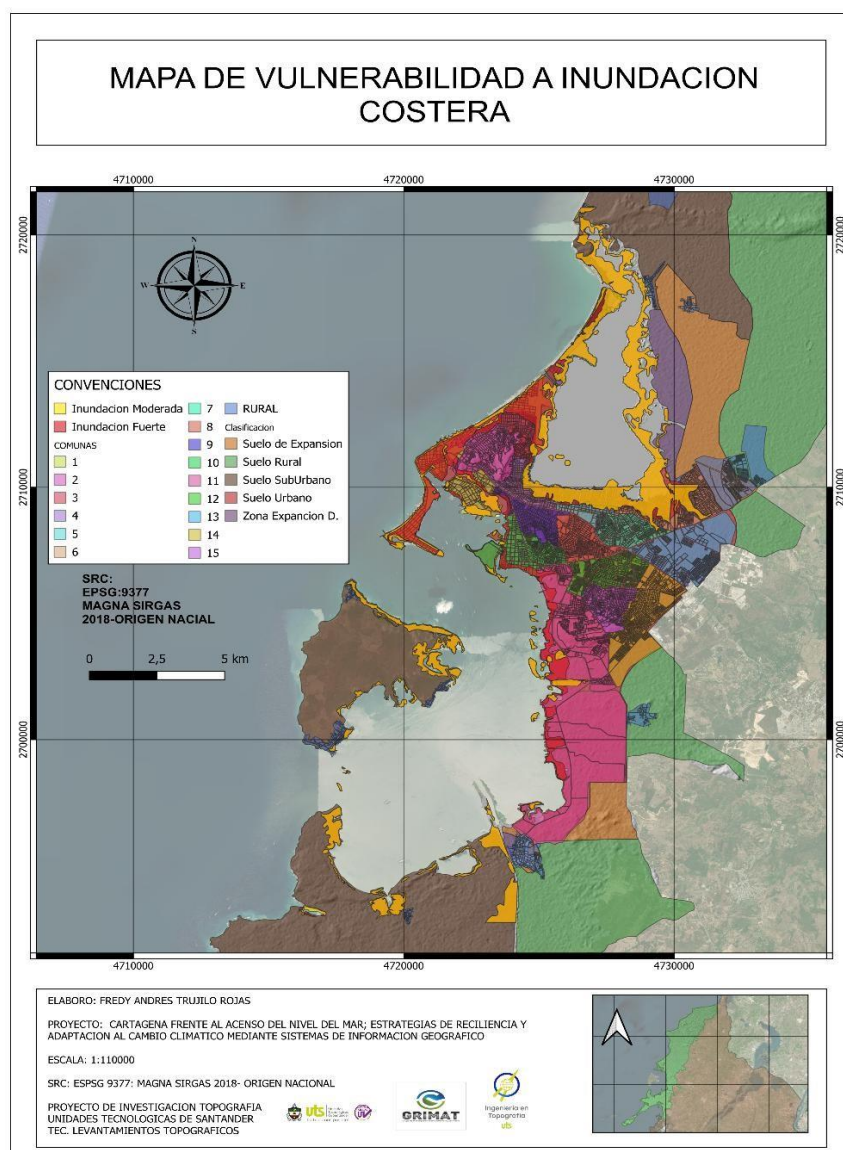
Las inundaciones moderadas se encuentran en la parte costera ya que son la conexión con la playa y sus efectos destructivos no van hacer iguales como serian en las partes más alejadas ya que hay se encuentran en su mayoría la población y la parte histórica de Cartagena, y las inundaciones fuertes ce igual manera empiezan desde la costa y se van dirigiendo hacia dentro del municipio esto sobreponiendo la moderada de la fuerte esto indicando que las playas son por donde más cantidad de agua pasa en el momento de una inundación.

5. RESULTADOS

5.1. SINTESIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

5.1.1. Zonas de Mayor afectación de inundación

Figura 15. Mapa de vulnerabilidad costera



Fuente: Autor

ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

EL cruce de capas de inundación comunas y uso del suelo nos permite observar principalmente que las zonas de mayor riesgo de inundaciones costeras, se logra ver que en su gran mayoría de los datos de inundación afectan la zona de suelo urbano y sub urbano el cual es donde se concentra una gran parte de las poblaciones, esto dando a entender que afecta directamente infraestructura, vías, al ser tan cercano de las playas también la economía por turismo.

Así mismo la comuna 1 es una de las localidades de mayor impacto ya que es la comuna con mayor cantidad de barrios implicados en inundaciones ya que su ubicación es muy costera, esto implicando a que en una inundación de gran tamaño pueda ser fulminante para la sociedad de esta zona.

Generalizando, se puede entender que la amenaza no es de manera homogénea, si no que se encuentran totalmente en la zona de transición entre agua y tierra, así mismo el que las zonas de impacto sean urbanas implica muchos daños a la gente y a la infraestructura de la región, añadiendo que Cartagena guarda una gran cantidad de monumentos históricos, puede verse afectada mucha historia regional.

Tabla 1. Matriz de riesgo de inundación

MATRIZ RIESGO INUNDACION COSTERA					
Elemento evaluado	Amenaza	Exposición	Vulnerabilidad	Riesgo	Nivel de riesgo
vivienda	5	5	5	125	Muy alto
Vías	4	5	4	80	Alto
Cultivos	3	2	3	18	Muy Bajo
Población	5	5	5	125	Muy alto
infraestructura	5	5	5	125	Muy alto

Fuente: Autor

ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

Tabla 2. Matriz Amenaza Costera

MATRIZ AMENAZA COSTERA				
Sector	Pendiente	Elevación	Distancia a la costa	Frecuencia de inundación
comuna 1	4	5	5	5
comuna 2	5	5	5	5
comuna 3	3	5	5	4
comuna 4	4	5	5	5
comuna 5	5	5	5	5
comuna 6	5	5	5	5
comuna 9	5	5	5	5
comuna 10	5	5	5	5
comuna 11	5	5	5	5
PROM	4,56	5	5	4,89
FRECUENCIA	MUY ALTA	MUY ALTA	MUY ALTA	MUY ALTA

Fuente: Autor

Podemos evidenciar en ambas matrices lo vulnerable y en la constante amenaza que se encuentra las personas en las playas de Cartagena.

En la primera matriz logramos identificar los riesgos de inundación costera y los elementos que pueden estar fuertemente implicados a este proceso, teniendo un resultado alarmante para algunos barrios y comunas, ya que al exponerse toda la parte de suelo urbano y sub suelo urbano se ve bastante afectada la

ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

población en general, salvándose el elemento de cultivos ya que el suelo rural se puede apreciar en las zonas que están más alejadas del litoral.

Así mismo, se puede observar en la segunda matriz algunos datos mucho más alarmantes ya que Cartagena es un municipio que se encuentra completamente sobre el nivel del mar y es escaso en lugares de gran altura y muy cercanos a la línea costera, esto aumentando en gran tamaño la amenaza a sufrir inundaciones por el aumento del nivel del mar.

5.1.2. Propuestas para la adaptación

Tabla 3. Tabla de Propuestas para adaptación a asenso del nivel del mar

Propuesta	en que consiste	que protege
Restauración de manglares	Recuperar de manera eficiente los manglares ya que por medio de sus raíces se podría disminuir el fuerte oleaje.	Ecosistema y comunidades
mejoramiento del drenaje	Ya que los barrios en los cuales se ve mayor impacto son bajos, el generar nuevos canales y la modernización de los sistemas de drenaje.	Barrios y vías
Adaptación en viviendas	Generar elevaciones en los pisos de las viviendas así mismo generar zapatas de mayor tamaño para evitar movimientos negativos de las viviendas luego de una inundación.	Viviendas y familias
Protección costera	Generar malecones adaptados, para una mayor evacuación de agua, así misma salva guardando la población y generando más turismo.	Infraestructura
Ordenamiento territorial	Generar cartografía con mayor detalle para re direccionar las zonas de ampliación y construir en lugares con menos peligro de inundación.	Zonas ampliación
Sistemas de alerta temprana	Crear alertas tempranas para una evacuación más eficaz, por posibles inundaciones u oleaje alto, preservando el bienestar de la población.	Población
Educación	Explicar a la comunidad el constante riesgo en el cual habitan y enseñarles como preservarse ante estos mismos	Comunidades

Fuente: Autor

6. CONCLUSIONES

- El análisis del modelo digital de elevación, nos permitió conocer que Cartagena es un municipio muy cercano a la costa y no tiene pendientes demasiado inclinadas, entendiendo que esto en un escenario de inundación es de mayor cuidado, así mismo como el uso del MNDWI que nos permitió identificar como ha cambiado la zona litoral y como el municipio ha perdido partes de su costa a través del largo de los años y como el agua cada vez más está consumiendo las playas.
- El generar cartografía temática nos permitió conocer las zonas, comunas y barrios que están en peligro constante por las inundaciones del ascenso del nivel del mar, así mismo el ordenamiento territorial nos permitió conocer el uso de suelo que tiene mayor afectación determinando que toda la población se establece en zonas de suelo urbano y sub urbano.
- El generar matrices de riesgo nos ayuda a complementar la cartografía establecida y nos permitió poder delimitar y establecer las zonas que están en mayor peligro y merecen una gran prioridad entre las estrategias de prevención y adaptación.
- Terminando se propusieron unas medidas para tener en cuenta, en las cuales está la recuperación de manglares, adaptación y demás medidas para ayudar a las comunidades a ser resilientes con el ascenso del nivel del mar.
- En conclusión, los SIG son importantes en el momento de hablar de un plan de ordenamiento territorial, ya que nos permite ubicar y plantear de manera eficaz la priorización de ciertas zonas de afectación.

7. RECOMENDACIONES

- Tener un constante seguimiento a la zona costera para poder monitorear que cambios y variaciones hay en el uso del suelo, en el litoral, y en los manglares esto siguiendo periódicamente las imágenes satelitales y en análisis de elevaciones,
- Estar en constante actualización de cartografía de gestión del riesgo ya que el ascenso del nivel del mar es un hecho el cual va aumentando, debe ser constante y eficaz la actualización para tener clara y en mayor precisión las zonas de riesgo.
- Tener una priorización amplia sobre las comunas y barrios los cuales están gravemente implicados y en constante amenaza de inundación, en el cual están todas aquellas tienen una baja elevación, muy cercanas al nivel del mar, y tiene una mayor vulnerabilidad.
- Continuar el desarrollo sobre el aumento del nivel del mar, implementado la erosión, tormentas, fuertes lluvias, ya que estos también son factores los cuales entran a la hora de hablar del aumento de las mareas.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- INVAMAR. (2014). *Assessing Coastal Vulnerability to Climate Change in Cartagena, Colombia*. Santa Marta, Colombia: INVEMAR.
- INVEMAR. (2018). *Lineamientos de adaptacion al cambio cliamtico para Cartagena de indias*. Santa Marta, Colombia: INVEMAR.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambrige, United Kingdom: Cambridge University Press .
- Longley, P., Goodchild, M., Maguire, D., & Rhind, D. (2015). *Geographic Information Science and Systems*. Chichester: John wiley & Sons.
- M., P. (2011). *Adaptation to Climate Change: From Resilience to Tranformation*. Routledge. London, United Kingdom: Routledge.
- McFadden, L., Nicholls, R., & Edmund, P.-R. (2006). *Managing Coastal Vulnerability*. Amsterdam: Elsevier.
- Moser, A. S. (2014). Asset planning for climatechange adaptation: Lessons from Cartagena, Colombia. *Environment and Urbanization*, 166-183.
- Restrepo-Angel, J., Hernandez-Carrasco, I., & Ortiz-Royero, J. (2021). Coastal subsidence increases vulnerability to sea level rise over twenty first century in Cartagena, Caribbean Colombia. *Scientific Reports*, 22434.
- Rosenzweig, C., Solecki, W., Romero-Lankao, P., Mehrotra, S., Dhakal, S., & Ali Ibrahim, S. (2018). *Climate change and cities: Second Assessment report of the urban climate change research network*. Cambridge: Cambrige University Press.
- Vernette, G., Correa, I., & Bernal, G. (2012). *Introduccion a los cambios del nivel del mar y sus concecuencias sobre la zona costera*. Medellin: Centro editorial de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.