



Iniciativa
**CIUDADES
EMERGENTES
Y SOSTENIBLES**



**INICIATIVA DE CIUDADES
EMERGENTES Y SOSTENIBLES**



ESTUDIO DE RIESGO DE DESASTRES Y VULNERABILIDAD ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA CIUDAD DE SANTA MARTA (COLOMBIA)



**INFORME DE AVANCE
VERSIÓN (18.04.2016)**

ÍNDICE

Capítulo 1.

1. INTRODUCCIÓN	1.1
1.1. Exposición de motivos	1.1
1.2. Objetivos del estudio	1.2
1.3. Estructura del estudio	1.2

Capítulo 2.

2. ENFOQUE METODOLÓGICO Y SELECCIÓN DE RIESGOS	2.1
2.1. Introducción	2.1
2.2. Marco conceptual.....	2.1
2.3. Enfoque metodológico	2.3
2.3.1. Cómo enunciar el riesgo	2.3
2.4. Ejemplo de cálculo de riesgo	2.4
2.5. Medidas de mitigación	2.5
2.6. Análisis y selección de amenazas	2.7
2.6.1. Análisis previo de las fuentes de datos de amenazas	2.7
2.6.2. Selección de actores clave	2.9
2.6.3. Proceso participativo de selección de amenazas	2.9
2.6.4. Amenazas priorizadas	2.10

Capítulo 3.

3. EVALUACIÓN DE LAS AMENAZAS DE INUNDACIÓN EN LA SITUACIÓN ACTUAL Y TENDENCIAL	3.1
3.1. Evaluación de la amenaza por inundación en situación actual	3.1
3.1.1. Introducción.....	3.1
3.1.2. Problemática.....	3.1
3.1.3. Descripción del área de estudio desde el punto de vista hidrológico	3.1
3.1.4. Descripción de las variables y modelos numéricos utilizados	3.4
3.1.5. Cálculo de la amenaza por inundación	3.6

Capítulo 4.

4. EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN.....	4.1
4.1 Exposición física a inundaciones en la situación actual y en el escenario tendencial 2050.....	4.1
4.1.1. Inventario de edificaciones en la zona de estudio	4.1
4.1.2. Inventario de infraestructuras críticas en la zona de estudio.....	4.5
4.2 Exposición humana a inundaciones en la situación actual y en el escenario futuro tendencial 2050.....	4.6
4.2.1. Población de la zona de estudio	4.6

Capítulo 5.

5. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD Y RIESGOS DE INUNDACIÓN EN LOS ESCENARIOS ACTUAL Y TENDENCIAL (en desarrollo)	5.1
---	-----

Capítulo 6.

6. PROPUESTA DE ACTUACIONES Y ANÁLISIS DE RIESGOS DE INUNDACIÓN EN EL ESCENARIO INTELIGENTE (en desarrollo).....	6.1
--	-----

Capítulo 7.

7. RIESGO DE ABASTECIMIENTO.....	7.1
7.1. Introducción y objetivos.....	7.1
7.2. Descripción general del sistema de abastecimiento de agua en el área metropolitana de la ciudad de Santa Marta.....	7.1
7.3. Análisis de recursos disponibles y demandas hídricas	7.5
7.3.1. Estimación de caudales fluyentes en los ríos cercanos	7.5
7.3.2. Disponibilidad de recursos subterráneos renovables.....	7.5
7.4. Escenarios de demandas y de balance hídrico.	7.6
7.4.1. Escenarios socioeconómicos de evolución de las demandas	7.6
7.4.2. Necesidades de recursos superficiales en los escenarios considerados.....	7.7
7.5. Diagnóstico y análisis de alternativas de actuación.	7.8
7.5.1. Balance hídrico por escenarios y definición de alternativas.....	7.8
7.5.2. Descripción de alternativas.....	7.9
7.5.3. Análisis coste-beneficio y comparación de alternativas	7.12



Capítulo 8.

8. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR EROSIÓN COSTERA	8.1
8.1. Introducción	8.1
8.2. Metodología	8.2
8.3. Antecedentes históricos.....	8.2
8.3.1. Historia antrópica	8.2
8.3.2. Evolución histórica de la playa.....	8.4
8.3.3. Eventos históricos de huracanes	8.7
8.3.4. Tránsito de crecientes en ríos.....	8.8
8.4. Dinámica marina	8.9
8.4.1. Oleaje en profundidades indefinidas.....	8.9
8.4.2. Oleaje en profundidades someras.....	8.11
8.5. Diagnóstico de la situación actual	8.13

Capítulo 9.

9. REFERENCIAS	9.1
----------------------	-----

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Exposición de motivos

Aproximadamente el 75% de la población de América Latina y el Caribe (ALC) habitan en ciudades. El rápido crecimiento urbano ha creado oportunidades para millones de personas, pero también representa grandes desafíos para los gobiernos¹.

Además de las grandes metrópolis, existen aproximadamente 140 ciudades con menos de dos millones de habitantes cuyas economías y poblaciones están en fase de crecimiento acelerado, razón por la cual se las ha denominado “ciudades emergentes”. Estas aún tienen la oportunidad de crecer de manera sostenible, pero para hacerlo con éxito, deben adoptar un enfoque planificado e integral que les permita, entre otros, utilizar eficientemente los recursos naturales y adaptarse a las consecuencias del cambio climático. Para apoyarlas en esta difícil tarea, el Banco Interamericano de Desarrollo ha puesto en marcha la Iniciativa Ciudades Emergentes Sostenibles (CES)².

Trujillo (Perú), Port of Spain (Trinidad y Tobago) y Santa Ana (El Salvador) fueron seleccionadas entre las primeras ciudades piloto de la Plataforma CES con el objetivo de identificar áreas de acción prioritarias que conduzcan a mejores políticas públicas y proyectos.

Tras la exitosa experiencia con este primer grupo de ciudades, se han ido integrando cada vez más ciudades a la Iniciativa (véase figura 1.1).

Uno de los grandes desafíos identificados durante la fase de diagnóstico fue la Sostenibilidad Ambiental y el Cambio Climático. En este contexto, el Banco Interamericano de Desarrollo seleccionó a IDOM Ingeniería y al Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria, IH Cantabria, para realizar los Estudios de Desarrollo Urbano y Cambio Climático, donde se enmarca el estudio de la vulnerabilidad ante desastres naturales asociados a los efectos del cambio climático.

El presente documento se centra en el caso de la ciudad de Santa Marta.



Figura 1.1. Ciudades que forman parte de la Iniciativa CES del BID

^{1,2} Guía metodológica Iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles, Primera edición 2012. Banco Interamericano de Desarrollo

1.2. Objetivos del estudio

Los impactos del cambio climático en las ciudades son cada vez más evidentes. Un aumento esperado en número e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos incrementará las pérdidas económicas y humanas, reducirá la disponibilidad de agua y la capacidad de producción, amenazarán las zonas costeras, y generará impactos sociales negativos significativos.

Por otra parte, la falta de una adecuada planificación urbana y rural agrava aún más el riesgo de eventos desastrosos. Según CEPAL/BID (2009), los costes acumulados de no reducir los impactos de eventos extremos en ALC en las próximas décadas podrían llegar a alcanzar los 250 mil millones de USD en 2100.

Por estas razones, el Banco pretende ofrecer a cada ciudad ESCI, datos y herramientas para evaluar las amenazas hidrometeorológicas y geofísicas clave, así como su vulnerabilidad y las opciones para la reducción de riesgos. Para ello, los objetivos específicos del presente estudio pretenden proveer de los siguientes aspectos:

- Inventario de desastres históricos,
- Análisis de amenazas pasadas y futuras teniendo en cuenta el cambio climático,
- Cálculo de la exposición, incluyendo:
 - Inventario de infraestructuras críticas (carreteras, electricidad...).
 - Inventario de zonas residenciales y comerciales afectadas.
- Descripción e identificación de funciones de vulnerabilidad, para cada construcción y amenaza considerada (e.j. CAPRA).
- Estimación de daños en términos de pérdidas humanas y materiales, expresados en máxima pérdida probable y daños anuales esperados.
- Desarrollo de mapas que ilustren los resultados del análisis probabilista de riesgos de desastres.
- Discusión de las causas socioeconómicas que contribuyen a la vulnerabilidad, de acuerdo a las consultas con los actores.
- Evaluación de medidas de reducción de riesgo con un análisis coste-beneficio.

1.3. Estructura del estudio

El presente estudio se ha estructurado en ocho capítulos. Los dos primeros son de carácter introductorio y contienen la exposición de motivos, objetivos del estudio y la organización del mismo –capítulo 1–, así como el marco conceptual y metodológico aplicado –capítulo 2–.

Los siguientes capítulos se destinan al análisis de componentes que integran el riesgo. Dado que el tratamiento de las amenazas lentas (en inglés *slow-onset*) conlleva importantes diferencias metodológicas con respecto al análisis de los riesgos asociados a las inundaciones, la evaluación del riesgo de disminución del recurso hídrico se desarrollará íntegramente en el Capítulo 7, mientras que la evaluación del riesgo por erosión costera se realiza en el Capítulo 8. Los capítulos intermedios (3 a 6) se centran en el análisis de riesgo de inundaciones siguiendo el esquema clásico amenaza-exposición-vulnerabilidad-riesgo; no obstante, parte de la información presentada en este bloque, en particular la de caracterización de la exposición y vulnerabilidad, se utilizará también en los capítulos 7 y 8.

En el capítulo 3 se evalúa la amenaza de inundación (actual y tendencial), incluyendo la descripción de la metodología utilizada, la caracterización de las variables y procesos involucrados en la amenaza y los resultados de calados y velocidades en el área de estudio para eventos de distinto periodo de recurrencia.

El capítulo 4 analiza la exposición desde dos prismas: Exposición física urbana, incluyendo un inventario de edificaciones, previa caracterización de las mismas, e infraestructura crítica y Exposición Humana –densidad de población–. Ambos epígrafes cuentan con un apartado de conclusiones donde se detallan los resultados en términos de edificaciones e infraestructura expuesta así como población expuesta según el tipo de amenaza considerada.

El capítulo 5 se centra en la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo asociados a la situación actual y al escenario tendencial, vinculado con el escenario de crecimiento del *Estudio de Crecimiento de Huella Urbana*. En él se recogen las funciones de vulnerabilidad aplicadas y los resultados de daños materiales y humanos de la amenaza estudiada. El análisis de las causas socioeconómicas del riesgo, y un diagnóstico general de la situación de la ciudad en relación con este fenómeno, completan el capítulo.

El capítulo 6, Evaluación de Riesgo Futuro Ciudad Smart, se encuentra también vinculado con el escenario de crecimiento del *Estudio de Crecimiento de Huella Urbana*, y describe las medidas necesarias para reducir los riesgos a unos niveles considerados como tolerables (escenario inteligente), incluyendo un análisis coste-beneficio de las mismas. Se presentan las amenazas y daños resultantes tras la aplicación de las medidas propuestas, y una comparación de los daños para los tres escenarios analizados: actual, tendencial y inteligente.

El capítulo 7 está dedicado íntegramente al estudio del riesgo de abastecimiento urbano, considerando el efecto de la variabilidad climática en los recursos disponibles, así como la evolución de la población y otros factores socioeconómicos y de gestión. Tras realizar un diagnóstico de la problemática existente y futura (escenarios actual y tendencial), se propondrán y compararán alternativas para resolver los principales problemas detectados.

Por último, el capítulo 8 incluye el estudio del riesgo de erosión costera, considerando las amenazas actuales y futuras (oleaje, corrientes y nivel del mar) junto con la evolución prevista de la ciudad (escenarios tendencial e inteligente). Al igual que en los capítulos anteriores, el escenario inteligente incluye un conjunto de actuaciones orientadas a mitigar los riesgos obtenidos.



2. ENFOQUE METODOLÓGICO Y SELECCIÓN DE RIESGOS

2.1. Introducción

En este capítulo se describe la metodología propuesta para el cálculo del riesgo frente a las amenazas identificadas en la zona de estudio. Primeramente se provee del marco conceptual para el cálculo del riesgo, incluidos sus componentes. A continuación, se presenta el enfoque metodológico global para el conjunto del estudio, incluyendo el enunciado del riesgo y un ejemplo del flujo de trabajo. Finalmente, se describe el proceso por el cual se han seleccionado los riesgos de estudio en la ciudad de Santa Marta.

2.2. Marco conceptual

Se define el riesgo como la probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas como resultado de una amenaza o peligro sobre una zona expuesta a la misma durante un periodo de tiempo determinado (Comisión Europea, Schneiderbauer et al., 2004). Por lo tanto, el riesgo (R) es función de la probabilidad de ocurrencia de esa amenaza (H), de la exposición (EX) de la zona o elementos objeto de estudio y de la vulnerabilidad (V) de los mismos. La Figura 2.1 muestra este marco conceptual para el cálculo del riesgo:

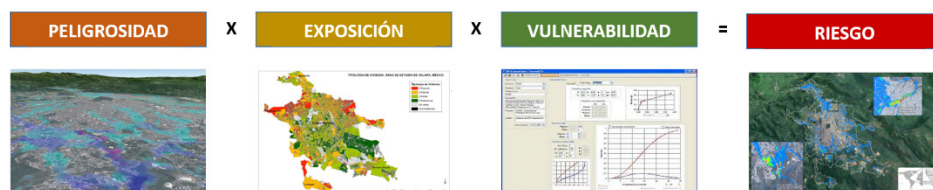


Figura 2.1. Marco conceptual (Ejemplo: Ciudad de Xalapa)

A continuación se recogen y definen los componentes del riesgo, siguiendo y/o adaptando las definiciones propuestas por la UN International Strategy for Disaster Reduction (2009) y aplicadas por la Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC-UNESCO, 2009) en el documento “Hazard Awareness and Risk Mitigation in Integrated Coastal Area Management (ICAM)”:

Riesgo: La combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas (UN/ISDR, 2009)¹.

Peligrosidad o Amenaza: Un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales (UN/ISDR, 2009). Un peligro está caracterizado por su localización, intensidad, frecuencia, probabilidad de ocurrencia y duración.

Exposición: La población, las propiedades, los sistemas u otros elementos presentes en las zonas donde existen amenazas y, por consiguiente, están expuestos a experimentar pérdidas potenciales. (UN/ISDR, 2009).

Vulnerabilidad: las condiciones y características de los elementos expuestos a la amenaza que les hacen más susceptibles de sufrir los impactos negativos de la misma (UN/ISDR, 2009)¹ y que, en definitiva, pueden implicar una mayor o menor afección al sistema. En evaluaciones probabilísticas/cuantitativas del riesgo, el término Vulnerabilidad expresa el porcentaje de elementos expuestos que es probable que se pierdan debido a una determinada amenaza.

Algunos de los componentes del riesgo incluyen, no obstante, varios conceptos o subcomponentes que deben ser a su vez considerados en el proceso de cálculo. La Figura 2.2 muestra los subcomponentes a analizar en el cálculo del Riesgo, la Peligrosidad y la Vulnerabilidad.



Figura 2.2. Marco conceptual ampliado

El análisis de la **Peligrosidad** incluye el estudio de las **Amenazas** (eventos físicos potencialmente dañinos) objeto de estudio, que serán función de su localización, intensidad, frecuencia, probabilidad de ocurrencia y duración. Para estudiar las amenazas es necesario calcular previamente las **Dinámicas** que generan esos eventos dañinos, pudiendo éstas ser una o varias (por ejemplo, si el evento potencialmente dañino es la inundación las dinámicas a analizar serán las precipitaciones, viento, caudales, etc.), considerando además el efecto del cambio climático en dichas variables si fuera aplicable.

La evaluación de la **Exposición** engloba la identificación y caracterización de los elementos expuestos, cuyas variables más relevantes son la densidad de población, la clasificación de viviendas por tipología constructiva y el catálogo de infraestructuras críticas. Para ello se desarrolla un inventario de activos expuestos basado en información oficial catastral disponible y en observaciones de imágenes de satélite e interpretación de las mismas. En el caso de bienes inmuebles, se estima el área de construcción, el valor de los activos (continente y contenido) y la localización de los mismos.

Por otra parte, el análisis de la **Vulnerabilidad** de los elementos expuestos incluye el estudio del grado de afección que puede generar la amenaza en los elementos expuestos, siendo una cualidad intrínseca al sistema y función de las características naturales de esos elementos y del umbral a partir del cual se produce el impacto objeto de estudio. Las funciones se definen en base a los diferentes tipos constructivos o infraestructuras identificadas y la amenaza considerada, caracterizando la capacidad del inmueble para resistir la acción del evento considerado.

Por último, el cálculo del **Riesgo** deberá estar enfocado a priori a unas consecuencias negativas determinadas del evento, que serán expresadas en términos de potencial de **Impactos** humanos y económicos. Estos impactos serán función de las características de la amenaza y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos. La valoración del riesgo se presenta en los siguientes términos:

Daños humanos:

- **Pérdida de vidas humanas:** es el número de fallecidos o heridos graves por un evento. Se adimensionaliza con la población total para obtener el **índice de fatalidad**.
- **Número de personas afectadas:** se define como el número de habitantes ubicados en lugares afectados por un evento (*ejemplo: en el caso de inundaciones, aquellos lugares con más de 30 cm de lámina de agua*). El **índice de afección** se obtiene de dividir dicho valor entre la población total.

Daños económicos: es el valor total, en \$ constantes del año en curso, del deterioro de valor de los activos en riesgo que se deriva de un determinado evento. El índice asociado expresa dicho valor como porcentaje de la renta media anual de la ciudad.

- **Pérdida anual esperada (PAE):** la PAE se calcula como la suma del producto entre las pérdidas esperadas para determinado evento, y la probabilidad de ocurrencia de dicho evento en un periodo de un año, para todos los eventos estocásticos considerados. En términos probabilistas, la PAE es la esperanza matemática de la pérdida anual.
- **Pérdida máxima probable (PMP):** la PMP representa el valor de pérdida global para una tasa de excedencia dada. Dependiendo de la capacidad de la entidad para manejar el riesgo, se puede optar por gestionar pérdidas hasta determinado periodo de retorno.

2.3. Enfoque metodológico

2.3.1. Como enunciar el riesgo

Dada la cantidad y complejidad de los conceptos definidos anteriormente y relacionados con el cálculo del Riesgo, es necesario plantear una manera homogénea de expresar los resultados del Riesgo. Se propone la siguiente estructura:

¿Cuál es el **RIESGO** de **UN IMPACTO** por **UNA AMENAZA** en **UN RECEPTOR** en **UNA ESCALA TEMPORAL** para un **PERIODO TEMPORAL**?

Ejemplo:

¿Cuál es la **PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE** de **AFECCIÓN A INFRAESTRUCTURAS** por **INUNDACIÓN** en **SANTA MARTA TENDENCIAL** en **2050** para un **PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS**?

Por lo tanto, para calcular el **riesgo de un determinado impacto generado por una amenaza debida a un evento de inundación en un receptor en una escala temporal para un periodo temporal determinado**, se cruzará la información de peligrosidad, de exposición y de vulnerabilidad, para esa probabilidad de ocurrencia y esas condiciones de espacio y tiempo, teniendo en cuenta las dimensiones humana y de infraestructuras.

Un estudio genérico se organizará de acuerdo con la siguiente estructura:



Tabla 2.1. Ejemplo de estructura de un análisis genérico de riesgo por inundación

2.4. Ejemplo de cálculo de riesgo

De acuerdo con el enfoque metodológico anterior en la figura 2.3 se muestra un ejemplo de los pasos a seguir y un diagrama de flujo para la evaluación del riesgo. En la tabla2 se concreta más el ejemplo para evaluar riesgos de inundación.

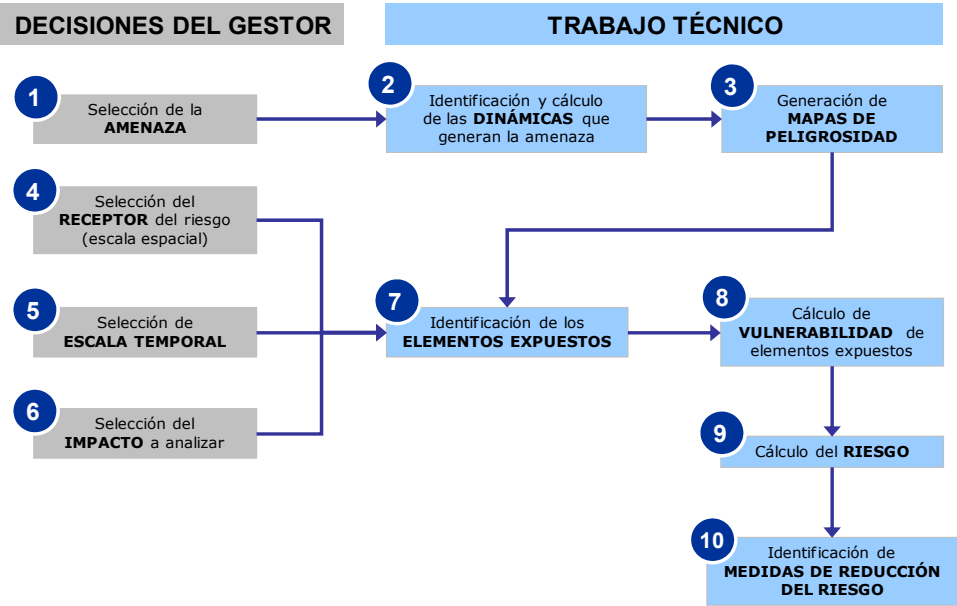


Figura 2.3. Proceso de cálculo de riesgo

No.	ETAPAS	Ejemplo
1	Selección de la amenaza	Inundación
2	Identificación y cálculo de las dinámicas que generan la amenaza	Precipitaciones, viento, proyecciones de cambio climático, etc.
3	Generación de mapas de peligrosidad	Mapas de inundación
4	Selección de receptor del riesgo (escala espacial)	Huancayo Tendencial
5	Selección de la escala temporal	2050
6	Selección del impacto	Población afectada
7	Identificación de elementos expuestos	Población expuesta (permanente + temporal)
8	Cálculo de vulnerabilidad del elemento expuesto	Población sensible + resiliencia del municipio
9	Cálculo del riesgo	Pérdida de vidas humanas
10	Identificación de medidas de gestión del riesgo	Retranqueo, muros de protección, concienciación ciudadana, rutas de evacuación, etc.

Tabla 2.2. Ejemplo de cálculo de riesgo

En este trabajo se ha seguido esta metodología y diagrama de flujo. La estructura del informe corresponde directamente con este flujo de trabajo.

2.5. Medidas de mitigación

Por último, el análisis del Riesgo permitirá identificar las **Medidas de Mitigación del Riesgo**, que son aquellas medidas estructurales y no estructurales tomadas para limitar el impacto adverso de peligros naturales (UN/ISDR, 2009).

- **Medidas estructurales**, entendidas como actuaciones de modificación del espacio físico mediante obras de diversa naturaleza, y,
- **Medidas no estructurales**, que agrupan un conjunto variado de herramientas de carácter “blando”: concienciación y capacitación, modificación del marco legal, cambios en las estructuras y funcionamiento de los organismos implicados, etc.

En muchos casos, ambos tipos de medidas son complementarias y deben llevarse a cabo de forma simultánea y coordinada.

Esta definición de medidas de actuación está directamente vinculada con los escenarios de crecimiento definidos en la Componente 3, distinguiendo:

- **Escenario inteligente** (Smart) consiste en llevar a cabo una serie de actuaciones de consolidación y mejora que implican también cierta reordenación urbana,
- **Escenario tendencial** se define por una crecimiento demográfico severo, un crecimiento económico moderado y una actitud pasiva ante los riesgos evaluados;

Por tanto, tras la evaluación de los daños esperados en la situación actual, la identificación de medidas se integra en el escenario inteligente, reflejando una estrategia proactiva, basada en reducir daños mediante inversiones antes de que se produzcan. En contraposición, el escenario tendencial no acomete obras significativas para paliar los riesgos, pero si incurre en gastos para remediar los daños provocados (estrategia reactiva). (Ver figura 2.4).

Para comparar ambos escenarios en términos económicos, se realizará un **análisis coste-beneficio**, valorando la suma de los costes de mitigación y reposición de activos dañados en ambos casos, bajo la condición de que los beneficios generados son los mismos. Para satisfacer esta última condición, se debe cumplir que no existe pérdida neta de valor de activos en ninguno de los dos escenarios, equivalente a una reposición total de los daños causados a partir del instante inicial, o bien que en el escenario tendencial se restituyen los daños generados al menos en una cantidad tal que se equiparen a los daños del escenario inteligente. Por último, es necesario hacer constar que el concepto de mitigación que aquí se emplea es el correspondiente al ámbito de la gestión del riesgo de desastres y no al de cambio climático. Por tanto en este informe la palabra mitigación no corresponde a medidas destinadas a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero

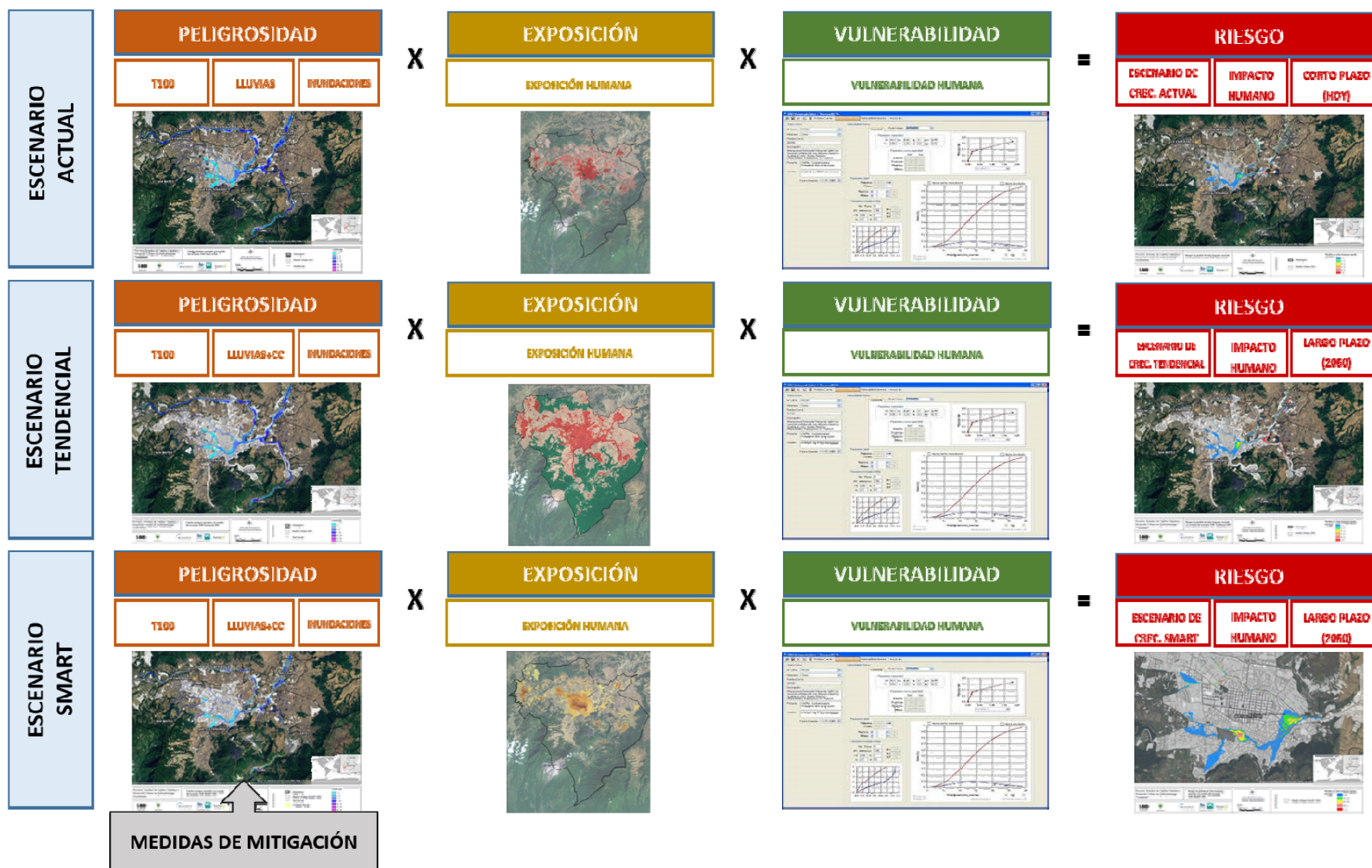


Figura 2.4. Ejemplo de estructura de evaluación de riesgos humanos para los 3 escenarios de crecimiento estudiados (Quetzaltenango – Guatemala).

2.6. Análisis y selección de amenazas

Los TsdR, señalan que la selección de amenazas debe considerar la siguiente lista:

“Rapid-onset Hazards”

- Inundación costera (storm surge)
- Inundación terrestre
- Huracanes y vendavales extremos
- Sismos
- Vulcanismo
- Deslizamientos
- Incendios

“Slow-onset Hazards”

- Ola de calor
- Erosión costera (incluyendo subida del nivel del mar)
- Salinización de acuíferos
- Sequías
- Efecto del cambio de temperatura, precipitación, insolación y variabilidad climática en recurso hídrico o comida

De esa lista, y por medio de un proceso participativo con los principales actores, se deberán seleccionar las tres amenazas más relevantes debiendo ser al menos una de ellas del grupo de “slow-onset”. La selección deberá tener en cuenta la frecuencia, la recurrencia, el área/población afectada y el impacto en los sectores críticos.

Al objeto de dar respuesta a los requerimientos de los TsdR, los trabajos realizados para la selección de amenazas se han llevado a cabo en tres fases diferenciadas:

1. Análisis previo de las fuentes de datos de amenazas en la zona
2. Selección de actores clave
3. Proceso participativo de selección de amenazas

2.6.1. Análisis previo de las fuentes de datos de amenazas

Previo a la realización de la misión a la ciudad de Santa Marta se efectuó un análisis de las diferentes fuentes de datos existentes sobre amenazas en la zona, y muy en particular a la información contenida en:

- Base de datos Desinventar
- Estudio de Amenazas Naturales y Antrópicas en las Zonas Costeras Colombianas realizado por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), conteniendo esté ultimo además de los eventos registrados en Desinventar, la inclusión de datos de la Dirección General para la Prevención y Atención a Desastres (DGPAD).
- Noticias y notas de prensa

Utilizando la base de datos DESINVENTAR se ha realizado un análisis multi-criterio que permite la comparación y priorización de las amenazas. Para ello se han seleccionado los registros inventariados en el área de estudio preliminar, cuyos 238 registros han sido tratados y reclasificados según el listado de amenazas indicado en los TsdR y se han seleccionado los criterios de priorización teniendo en cuenta aspectos tales como: frecuencia y recurrencia, daños humanos, daños a edificaciones, daños económicos e impactos en sectores clave, etc. existiendo criterios que se nutren de varias variables (ejemplo: Daños edificaciones se componen de dos variables, viviendas destruidas y viviendas afectadas). A estos últimos se les aplica una ponderación por el método Delphi en base a la experiencia adquirida por IDOM-IHC en otras ciudades, resultando la matriz de priorización por criterios seleccionados la siguiente (de 1 a 7 en orden de importancia, 1: más recurrente/frecuente o dañino, 7: menos recurrente/frecuente o dañino):

	Tipo de evento	Recurrencia (nº casos/ periodo de estudio)	Frecuencia (media nºeventos/ año)	Daños Humanos	Daños Edificaciones	Daños Económicos (USD)	Infraestructuras Críticas
RAPID-ONSET HAZARDS	Inundación costera	6	6	5	5	2	2
	Inundación fluvial	1	1	1	1	1	1
	Huracanes y tormentas	2	5	2	2	3	3
	Sismos	7	7	7	4	4	6
	Actividad volcánica						
	Deslizamientos	3	3	3	3	4	4
	Incendios forestales	4	2	4	6	4	5
SLOW-ONSET	Olas de calor/Heladas						
	Erosión costera	2	2	2	4	3	4
	Salinización de acuíferos	7	7	6	7	5	5
	Sequía	5	4	6	6	4	6
	Otros efectos del cambio climático						

Tabla 2.3. Matriz de priorización de amenazas.

Teniendo asimismo en cuenta los resultados del Estudio de Amenazas Naturales y Antrópicas en las Zonas Costeras Colombianas realizado por INVEMAR para el caso concreto de Santa Marta:

EVENTO	PROPORCIÓN DE EVENTOS	NÚMERO DE EVENTOS
Inundaciones	50.91%	28
Vendaval / Tormenta tropical	21.82%	12
Aumento nivel medio del mar (ANMM)	10.91%	6
Sequía	5.45%	3
Lluvias	3.64%	2
Sismo	3.64%	2
Contaminación	1.82%	1
Otros	1.82%	1

Tabla 2.4. Representación en porcentaje de los eventos reportados en el Distrito Especial de Santa Marta (Magdalena), Caribe Colombiano. Fuente: Estudio de Amenazas Naturales y Antrópicas en las Zonas Costeras Colombianas, INVEMAR.

Esta tabla incluye las inundaciones, tanto fluviales como costeras, como los eventos más frecuentes. Las inundaciones en Santa Marta, se producen debido a las lluvias intensas provocadas por el paso de borrascas que asolan la zona, causando el desbordamiento de ríos en el caso de las primeras -inundaciones fluviales-, y el ascenso del nivel del mar, en el caso de las segundas -inundaciones costeras-. Este fenómeno de ascenso del nivel del mar está muy ligado a la erosión litoral, identificando varias áreas críticas en la zona según muestran estudios específicos de evaluación y seguimiento (ver siguiente figura).

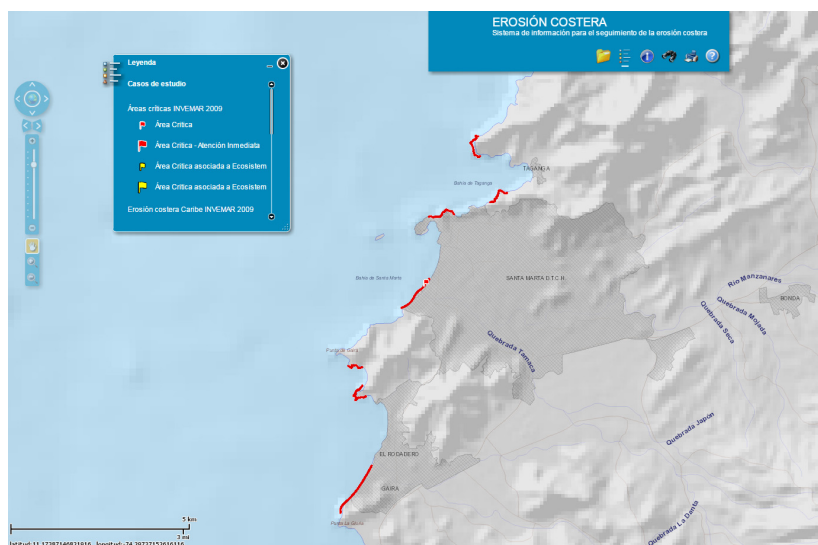


Figura 2.5. Sistema de información para el seguimiento de la erosión costera.

Fuente: <http://gis.invemar.org.co/erosioncostera/>

2.6.2. Selección de actores clave

De acuerdo con los TsdR la priorización final de amenazas ha de realizarse por medio de un proceso participativo con los actores locales. A tal fin se ha realizado una identificación de actores clave tanto por sus competencias en aspectos relacionados con la gestión de riesgos, como por el impacto que las amenazas naturales pueden tener en su actividad o, al contrario, el impacto que sus actuaciones pueden tener en la amplificación de los efectos dañinos de las amenazas naturales. Los actores claves identificados son:

- Alcaldía de Santa Marta
- Gerencia de Turismo de Santa Marta
- Gerencia de Planeación de Santa Marta
- Empresa de abastecimiento urbano. Metroagua
- Defensa Civil Colombiana. Seccional Magdalena.
- Empresa de distribución de energía eléctrica. Electricaribe
- Puerto de Santa Marta

- Promotora Urbana de Santa Marta.
- Gerencia de Riesgos. Depto. Del Magdalena
- Gerencia de Proyectos. Depto. Del Magdalena
- Corporación Ambiental del Magdalena. CORPAMAG
- Dirección General Marítima. DIMAR
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. INVEMAR
- Empresa de Residuos de Santa Marta.
- Fundación Pro-Sierra Nevada de Santa Marta

Cabe señalar que esta lista ha sido posteriormente validada durante el proceso participativo de selección de amenazas.

2.6.3. Proceso participativo de selección de amenazas

Como fase final en el proceso de selección de amenazas, se realizó un proceso participativo con los actores clave identificados. Dicho proceso participativo ha consistido, a su vez, de dos partes diferenciadas, una primera en la que se les aportaba información sobre las amenazas identificadas en el análisis previo y una segunda en la que se les solicitaba que priorizaran, desde el punto de vista de su actividad, el grado de importancia de cada una de las amenazas identificadas.

Además de las entrevistas generales con los representantes de las diferentes instituciones, se mantuvieron reuniones específicas para la identificación detallada de las zonas más afectadas por las amenazas objeto de estudios existentes.

Como resultado de las diferentes entrevistas se concluye que:

- La amenaza priorizada por todos los participantes fue la del recurso hídrico, en dos sentidos: por un lado la vulnerabilidad y sostenibilidad del sistema de captación en cauces y pozos; y, por otro, la antigüedad y mantenimiento de los sistemas de distribución. También preocupa la posible disminución de la disponibilidad del recurso hídrico, por efecto del cambio de temperatura, precipitación, insolación y variabilidad climática. Cabe señalar que este riesgo,

con sus implicaciones en sectores críticos socioeconómicos y/o ambientales, no se recoge en los eventos de la base Desinventar.

- Se percibe una preocupación creciente por el riesgo de inundación urbana debido a lluvias intensas y desbordamiento de los cauces que atraviesan el núcleo urbano.
- La ciudad cada vez es más consciente de su vocación turística, y ve con mayor preocupación la erosión costera que afecta a las playas. La pérdida y posible desaparición de los arenales urbanos se percibe como un riesgo económico y un claro limitante al crecimiento.

2.6.4. Amenazas priorizadas

El análisis previo de las bases de datos disponibles indicaba que las amenazas más relevantes para la ciudad de Santa Marta eran la sequía urbana, las inundaciones, los vendavales, los deslizamientos, los sismos y la erosión costera. Tras el proceso participativo con los actores clave desarrollado en la misión, se propone el estudio en detalle de las siguientes amenazas:

- 1. Disminución del recurso hídrico y sequía urbana.**
- 2. Inundación de la zona urbana por lluvias locales y desbordamiento de los ríos Manzanares y Gaira, y de las quebradas Bureche y Tamacá.**
- 3. Erosión costera en las playas de Santa Marta, Rodadero y Rodadero Sur.**

Cabe indicar que dos actores relevantes (el Director de Defensa Civil y la gerente de riesgos del Depto. del Magdalena) indicaron que el riesgo más importante en la ciudad, si bien no el más frecuente, es el de sismos. Santa Marta se encuentra en una zona de fallas (la falla de Oca), y el último sismo de importancia tuvo lugar en 1834; si bien no existe información fiable sobre la cuantía de los daños en dicho evento, al parecer casi todas las edificaciones quedaron en ruinas.

Se han preseleccionado los tres riesgos anteriores basándose en su alta recurrencia, que a su vez determina el grado de percepción social de dichos fenómenos. Asimismo, se trata de riesgos que a menudo permiten soluciones estructurales y que pueden ser abordados mediante inversiones de carácter estructural y por fases (p.ej. construcción de colectores de aguas pluviales por sectores urbanos o incremento progresivo de las fuentes hídricas).

3. EVALUACIÓN DE LAS AMENAZAS DE INUNDACIÓN EN LA SITUACIÓN ACTUAL Y TENDENCIAL

3.1. Evaluación de la amenaza por inundación en situación actual

3.1.1. Introducción

En este capítulo se presenta el estado de los trabajos sobre la amenaza por inundación en situación actual, que se ha realizado teniendo en cuenta las conclusiones y resultados obtenidos tras la segunda misión a Santa Marta que tuvo lugar la primera semana de abril de 2016.

A continuación se incluye una breve caracterización de la problemática, la descripción de la zona desde el punto de vista hidrológico, los datos pluviométricos utilizados en el estudio, junto con la caracterización del régimen extremal, los resultados del estudio hidrológico de las cuencas vertientes a la ciudad, y, por último, los resultados del modelado hidráulico.

3.1.2. Problemática

La inundación del centro urbano y del entorno metropolitano de la ciudad de Santa Marta constituye uno de los riesgos naturales que afecta de forma más significativa al futuro desarrollo sostenible de la misma.

El municipio de Santa Marta ha sido afectado reiterada e históricamente por inundaciones y avenidas torrenciales, siendo la más perjudicada la ciudad de Santa Marta, debido a los desbordamientos de los ríos Manzanares y Gaira, y las quebradas Bureche y Tamacá por efecto de las tormentas registradas en las vertientes medias y altas de la Sierra Nevada de Santa Marta.

Esta situación se ha agravado en los últimos años por diferentes procesos históricos de desplazamiento y a su vez de invasión de manera no planificada, que han dado lugar a un crecimiento urbano descontrolado que ha ido limitando la capacidad hidráulica de los ríos y arroyos que la atraviesan, hasta límites tales que, actualmente, hacen extremadamente vulnerables algunas zonas urbanas próximas a ellos.

El cauce principal en cuya cuenca se engloba la zona urbana es el río Manzanares, donde se encuentra asentada la mayor parte de la población urbana; los estratos sociales más bajos han tomado terreno que pertenece al río Manzanares y su zona de amortiguación de crecientes, lo que no solo aumenta los riesgos de la población ante la crecida del río, sino que también afecta desde el punto de vista ambiental e hidráulico. De igual manera en la zona baja del río se ha pavimentado y construido en los humedales que constituían el parte de la zona inundable del mismo.

Esta situación se repite en el río Gaira y las quebradas Bureche y Tamacá, que también sufren inundaciones cíclicas que se han agravado en los últimos años por acciones antrópicas (recientes construcciones civiles en áreas inadecuadas y deficiente planificación urbana).

3.1.3. Descripción del área de estudio desde el punto de vista hidrológico

En el caso de Santa Marta el área de estudio para la definición de los riesgos de inundaciones se ha establecido mediante un proceso iterativo que relaciona estos análisis con los estudios de la componente CE3. Se han tenido en cuenta las previsiones de crecimiento urbano, el análisis de calidad de los datos topográficos disponibles (condicionante fundamental de la precisión de los resultados), y, por supuesto, las características hidrológicas de la zona.

De esta forma el área de estudio se ha conformado en un polígono irregular de unos 150 km² que abarca la mayor parte del espacio urbano de la ciudad de Santa Marta (huella urbana actual más los crecimientos dispersos) y su área de expansión teniendo en cuenta límites urbanos establecidos por el POT, incluyendo los límites de los parques nacionales establecidos y las zonas rurales de Bonda y Taganga (Figura 3.1).

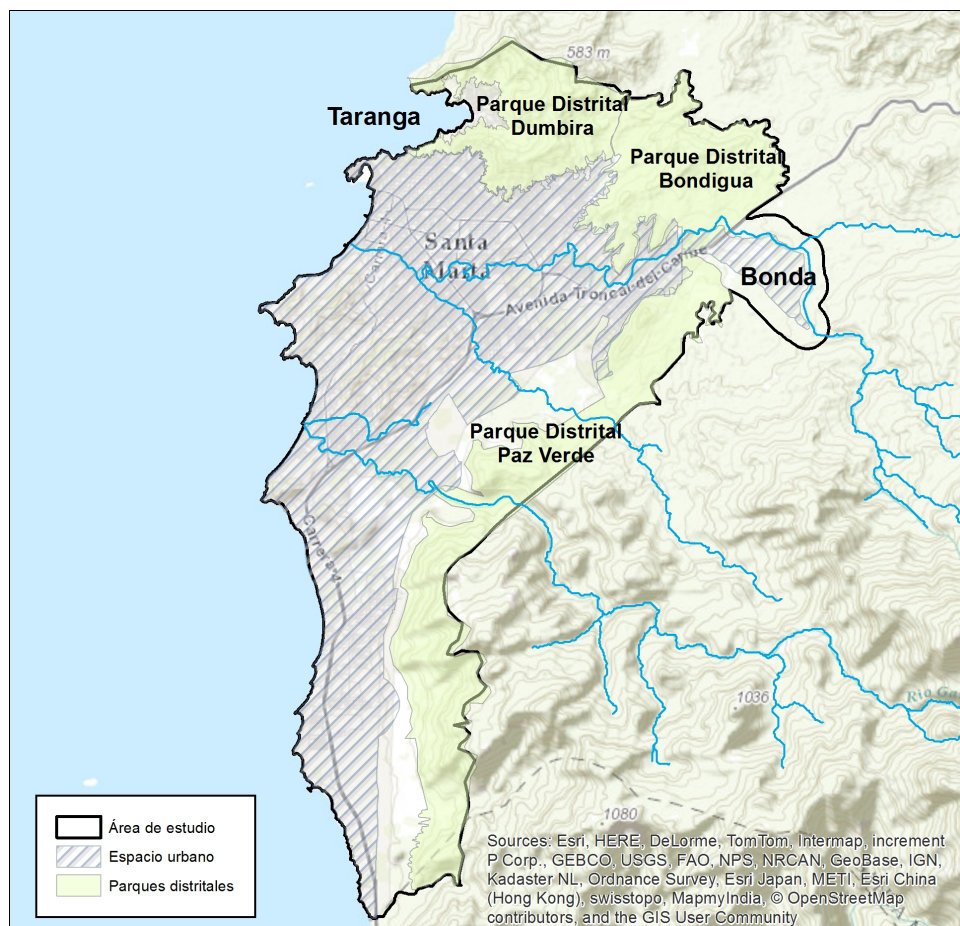


Figura 3.1. Área de estudio de la ciudad de Santa Marta.

La ciudad de Santa Marta se encuentra dentro del departamento del Magdalena que desde el punto de vista hidrológico está conformado por cuatro macrocuencas hidrográficas. Las cuencas que drenan a la ciudad de Santa Marta se encuentran dentro de la primera de ellas a la que pertenecen los ríos que nacen en la ladera septentrional de la Sierra Nevada: Palomino, Don Diego, Buritaca, Guachaca, Mendiguaca, Piedras, Manzanares y Gaira. Estos ríos después de un corto recorrido desembocan en Mar Caribe por las principales bahías y ensenadas que se encuentran en esta parte del departamento del Magdalena y se encuentran casi en su totalidad dentro del departamento de Santa Marta tal y como se muestra en la figura 3.2.



Figura 3.2. Localización que forman parte de la ladera septentrional de la Sierra Nevada de Santa Marta.

Río	Área cuenca [Km ²]	Longitud [Km]	Q medio [m ³ /s]
Palomino	684	68.2	25.9
Don Diego	536.8	55.1	36.1
Buritaca	305	50.3	-
Guachaca	267.9	44.6	14.8
Mendiguaca	61.67	12.6	2.5
Piedras	162.1	59.9	5.5
Manzanares	189.6	32.5	2.7
Gaira	104.64	32.3	2.5

Tabla 3.2. Características de las principales cuencas pertenecientes a la ladera septentrional de la Sierra Nevada de Santa Marta.

De entro los ríos que forman parte de esta macro cuenca, el estudio de inundación de la ciudad de Santa Marta requiere caracterizar los ríos que vierten a la ciudad, en este caso Manzanares y Gaira.

A continuación se describen brevemente las características generales de ambos ríos y de sus principales afluentes en enmarcados dentro del área vertiente a la zona de estudio.

Río Manzanares

El río Manzanares nace en la vertiente noreste de la Sierra Nevada de Santa Marta exactamente en la Cuchilla de San Lorenzo a 2,300 msnm. El río Se origina a partir de la unión de las quebradas Onaca y Girocasaca y desemboca en el Mar Caribe en la playa conocida común o popularmente como Los Cocos dentro de La Bahía de Santa Marta.

La cuenca del río Manzanares tiene un área de 189.6 Km² y una alcanza una longitud de unos de 32.5 km hasta su desembocadura atravesando 25 barrios de la ciudad de Santa Marta. En su origen y primer tramo al río Manzanares se le llama río Bonda. A medida que fluye hacia el área urbana, luego de pasar por Mamatoco, el río continúa su curso cerca de la Quinta San Pedro Alejandrino, los barrios que bordean la parte sur de la Avenida del Río y para cuando entra en la calle 30, ya ha recibido las aguas de la quebrada Tamacá, su principal afluente y, finalmente en la última parte de su recorrido transita por el barrio del mismo nombre.

Río Gaira

La cuenca del río Gaira se ubica en la vertiente noroccidental de la Sierra Nevada de Santa Marta. El área total de la cuenca hidrográfica es de 104.64 km² y el río, que nace a 2,750 msnm en el cerro de San Lorenzo, la recorre en dirección este-oeste a lo largo de aproximadamente 32.3 Km. El río en su parte alta recorre el corregimiento de Minca y en su parte baja recorre la comuna de Gaira-Rodadero en el sur desembocando en el rodadero a la altura de "playa Salguero" (Puerto Gaira).

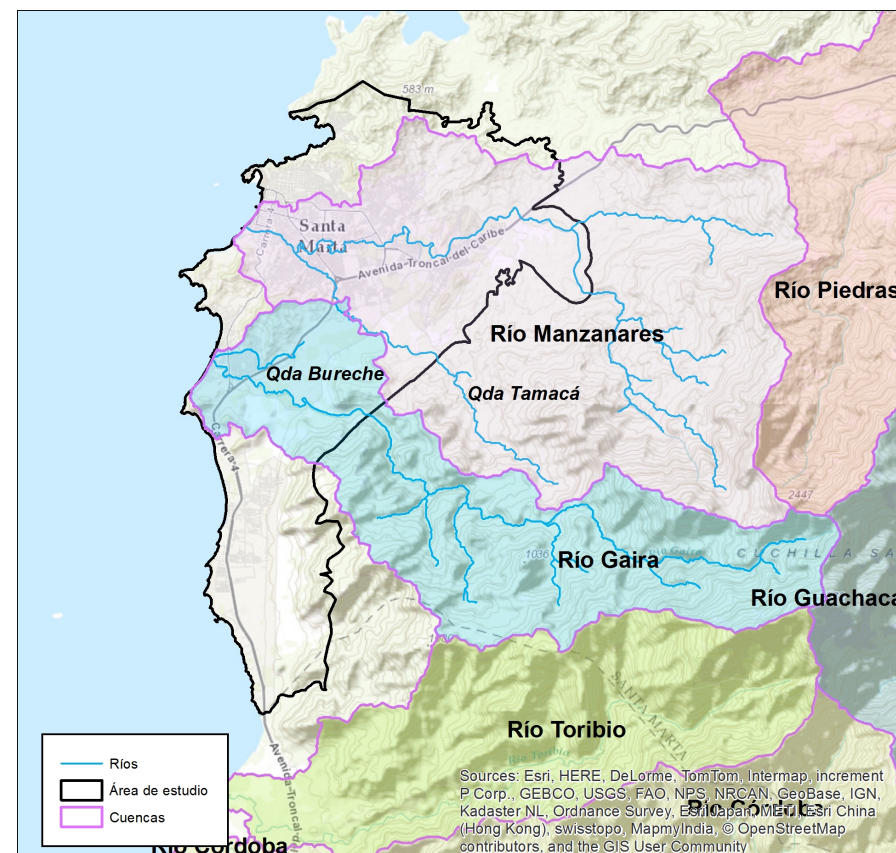


Figura 3.3. Área de estudio, con indicación de las cuencas vertientes a la misma y ríos principales.

3.1.4. Descripción de las variables y modelos numéricos utilizados

3.1.4.1. Datos históricos de caudales

Se dispone de dos estaciones de aforo en el entorno del área de estudio que han sido proporcionadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), ambas estaciones con datos de caudales medios y máximos mensuales (Figura 3.4).

ESTACIÓN	CÓDIGO	CORRIENTE	PERIODO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS [WGS 84]		ELEVACIÓN [M]
				LONGITUD	LATITUD	
BOCAT SANTA MARTA	15017060	Manzanares	1980-2014	1112N	7405W	60
MINCA	15017030	Gaira	1978-2014	1108N	7407W	650

Tabla 3.3. Nombre, localización y altitud de las estaciones pluviométricas utilizadas en el análisis.

3.1.4.2. Precipitaciones en situación actual

En el presente apartado se lleva a cabo la caracterización del régimen extremal de precipitaciones en la ciudad de Santa Marta y alrededores para la caracterización de la amenaza por inundación. La caracterización del régimen extremal de lluvia en la situación actual se utilizará posteriormente para derivar la amenaza por inundación extrema mediante modelado numérico.

Para la caracterización, se ha dispuesto de información instrumental de precipitaciones máximas en 24 h y totales, proveniente de la estación pluviométrica de Minca con un registro de más de 35 años de duración. La figura 3.5 muestra la localización de dicho pluviómetro, con información de la altitud (m) a la que se encuentran. La tabla 3.4 incluye la localización geográfica y altitud de las mismas.

La información de esta estación ha sido proporcionada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).

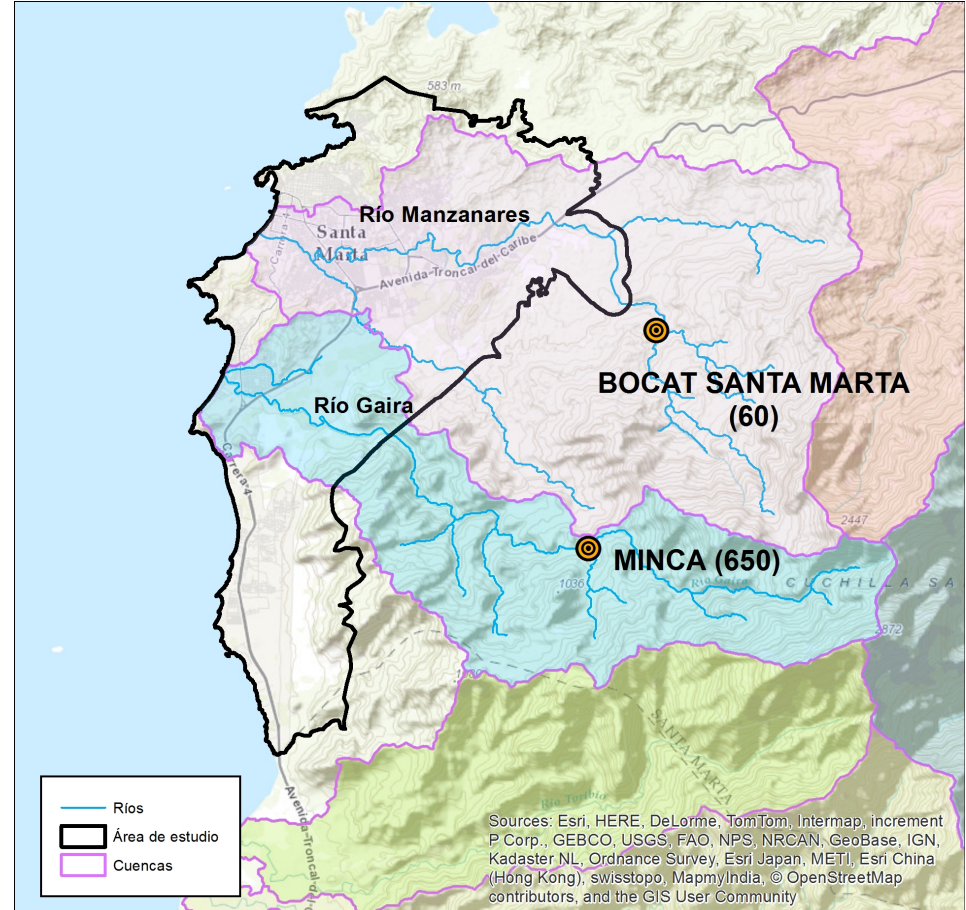


Figura 3.4. Localización de las estaciones hidrométricas Bocat Santa Marta y Minca.

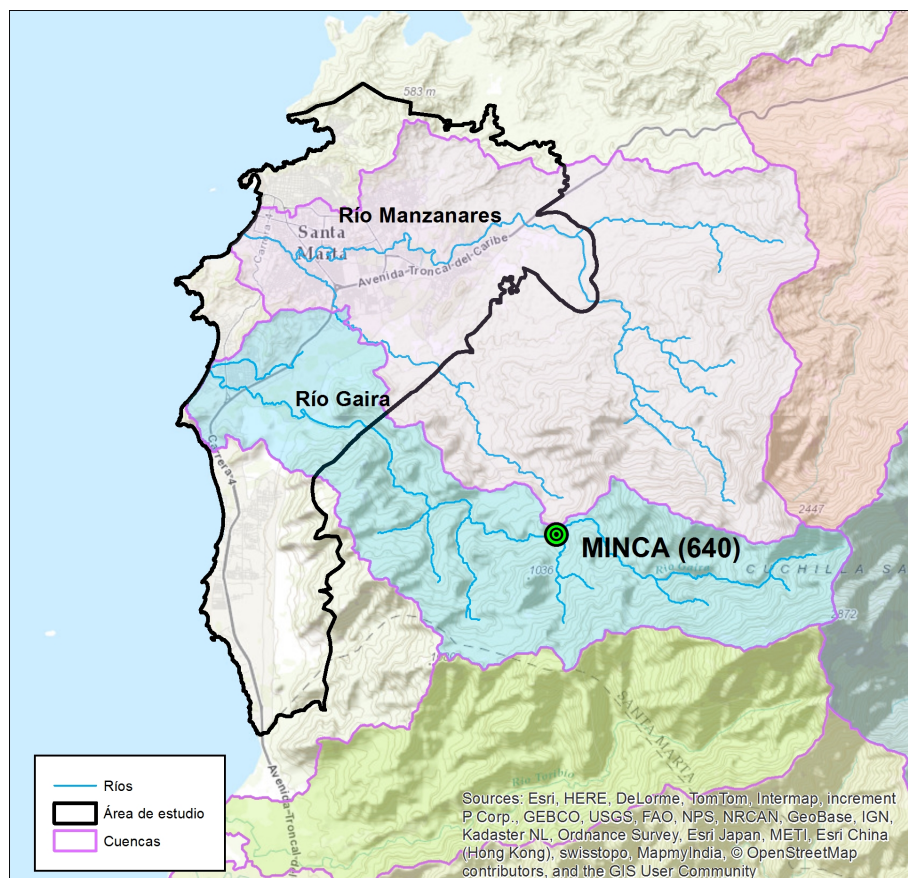


Figura 3.5. Localización de la estación pluviométrica de Minca.

ESTACIÓN	CÓDIGO	CORRIENTE	PERIODO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS [WGS 84]		ELEVACIÓN [M]
				LONGITUD	LATITUD	
MINCA	15010010	Gaira	1975-2014	1108N	7407W	640

Tabla 3.4. Nombre, localización y altitud de la estación pluviométrica utilizada en el análisis.

La caracterización del régimen extremal de precipitación se va a realizar por medio de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF). Estas curvas representan la relación matemática existente entre la intensidad de la precipitación, su duración y la frecuencia con la que se observa. La correcta caracterización estadística de la lluvia, sobre todo de corta duración, es muy importante para dimensionar el drenaje urbano y de esta manera evitar inundaciones súbitas en las áreas urbanas.

Las curvas IDF se han calculado mediante el siguiente procedimiento:

- 1) Se han calculado los máximos anuales de la intensidad de precipitación (mm/h) para el periodo de 24 horas.
- 2) Se han calculado los periodos de retorno de precipitación para los 10, 20, 50, 100 y 500 años con los máximos obtenidos en el paso anterior. Para ello se ha adoptado una distribución Gumbel.
- 3) Las relaciones o cocientes a la lluvia de 24 horas se emplean para duraciones de distintos periodos de agregación que van desde 1h 24 h. Estos datos serán obtenidos como un porcentaje de los resultados de la precipitación máxima probable para 24 horas, para cada período de retorno, diferentes porcentajes de este valor según los tiempos de duración de lluvia adoptados.
- 4) Con el propósito de poder realizar una interpolación de los resultados, se han ajustado los periodos de retorno a una función analítica con forma:

$$I = \frac{a \cdot T^b}{t^c}$$

donde I corresponde a los valores de intensidad de precipitación, t es la duración, T el periodo de retorno y a, b, c son constantes que dependen exclusivamente de las características de la zona de estudio.

Los datos de precipitaciones de las curvas IDF se han empleado para la determinación de las intensidades de precipitación asociadas a cada periodo de retorno en esa área, para la realización del cálculo hidrológico de la transferencia lluvia-caudal con el modelo InfoWorks ICM, tal y como se expondrá en los siguientes apartados.

En la figura 3.8 se muestran las curvas IDF obtenidas para los periodos de retorno de 10, 20, 50, 100 y 500 años en la estación pluviométrica de Minca.

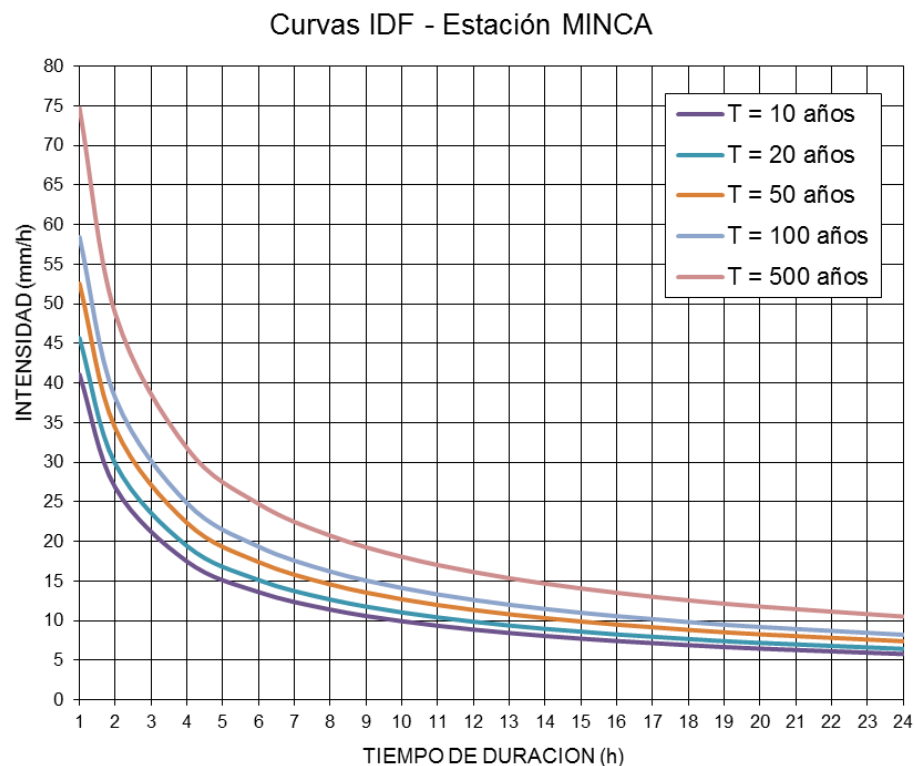


Figura 3.6. Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de la estación de Minca.

3.1.4.3. Modelos numéricos utilizados

Con el fin de analizar los eventos de inundación en la ciudad de Santa Marta se han realizado el modelado numérico de los aportes de caudal de las cuencas adyacentes al área de estudio. Este análisis se ha realizado mediante el modelo hidrológico **HEC-HMS**, obteniendo los caudales necesarios (*inflows*) para forzar un modelo bidimensional en la zona de estudio.

En base a los caudales obtenidos para cada evento se ha modelizado numéricamente el área de estudio con el modelo bidimensional hidrológico-hidráulico **InfoWorks ICM** que es capaz de tener en cuenta las la transferencia lluvia-caudal, rugosidad y capacidad de infiltración del terreno y diferentes condiciones de contorno (entre ellas el nivel del mar).

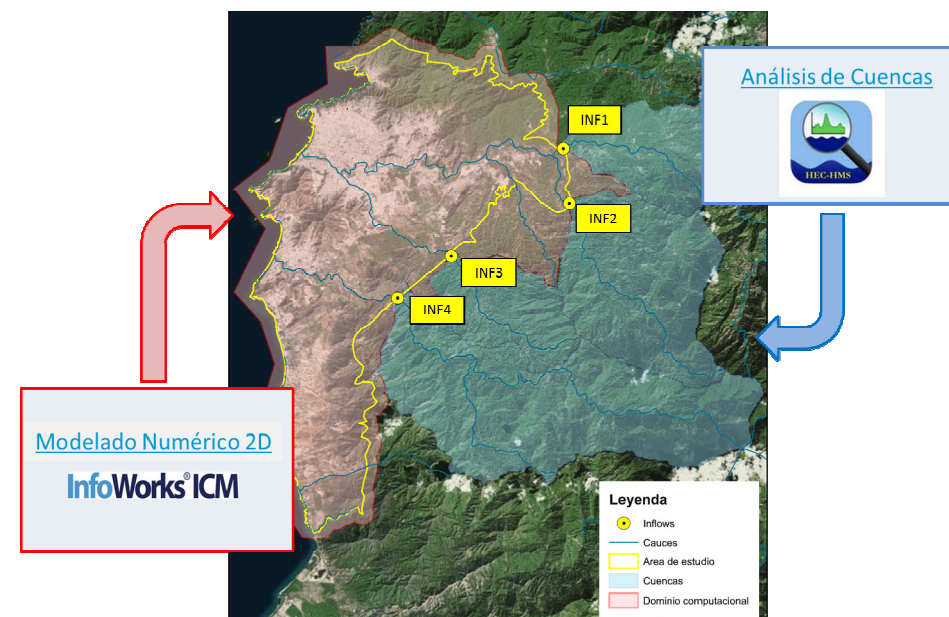


Figura 3.7. Delimitación de las zonas donde se ha aplicado cada modelo y puntos en los que se han obtenido los caudales de los ríos Manzanares, Gaira y quebrada de Tamacá.

3.1.5. Cálculo de la amenaza por inundación

El estudio de la amenaza por desbordamiento de los cauces en el área de estudio se abordará mediante la definición de calados y velocidades asociados a eventos de avenida con diferentes probabilidades de presentación.

En los estudios de amenaza por inundaciones, tras la determinación de las precipitaciones máximas asociadas a diferentes periodos de retorno (tal y como se ha expuesto en el apartado anterior), se deben determinar las escorrentías (caudales) asociados a las mismas.

Para el caso de la zona de estudio de Santa Marta el modelo hidrológico-hidráulico que se ha seleccionado es el **InfoWorks ICM** (*Integrated Catchment Modeling*), desarrollado por la empresa Innovyze. Tal y como se expondrá con detalle en los siguientes apartados, este modelo matemático integra totalmente el modelo de cuenca, permitiendo calcular la hidrología (transferencia lluvia-caudal), la hidráulica de redes de saneamiento y drenajes, así como la hidráulica fluvial.

Este modelo matemático permite modelizar:

- Hidrología, tanto en 1D, como en 2D
- Hidráulica fluvial en 1D, 2D o 1D+2D incluyendo puentes, redes de saneamiento y otras estructuras.
- Calidad de Aguas en 1D y 2D
- Control en Tiempo Real de Estructuras

A continuación se exponen de forma resumida las principales características del modelo referidas a los cálculos hidrológicos e hidráulicos que se aplican en este estudio:

1) Para el modelado de la **hidrología** se dispone de las siguientes opciones:

- Hidrología clásica (SCS, Green-Ampt, Horton, Wallingford, etc.)
- Hidrología 2D directa sobre la malla bidimensional de la cuenca completa.
- Cálculo de Infiltración en 2D. (Fija, Porcentaje o Horton)
- Cálculo de Evapotranspiración en 2D.

En la aplicación de una lluvia sobre una malla bidimensional se tiene en cuenta no sólo la lluvia neta, sino también la infiltración y escorrentía del terreno. El Modelo de Infiltración 2D calcula las propiedades de infiltración de los elementos de la malla, que se clasifican en diferentes zonas de infiltración de características definidas por el usuario.

Cada objeto tipo “superficie de infiltración 2D” tendrá asociado un modelo de infiltración, estando disponibles una serie de ellos, como son: Infiltración Constante, Infiltración Fija, e Infiltración tipo Horton.



2) En el modelado de la **hidráulica** InfoWorks ICM permite la modelización fluvial con zonas en 1D y 2D.

Los elementos del modelo de una red de drenaje se representan mediante nodos (pozos de registro y sumideros), conductos (tuberías) y subcuencas (que recogen la escorrentía de manzanas y viales). Estos elementos se denominan unidimensionales pues presentan sección constante y la resolución de las ecuaciones hidráulicas se realiza con la condición implícita de que el flujo en ellos solo puede ser paralelo a su eje (caso de tuberías de la red subterránea). Las principales características del cálculo 1D son las siguientes:

- Resuelve las ecuaciones completas de Saint Venant.
- Resuelve las ecuaciones mediante iteraciones, lo cual le da la mayor precisión, asegurando la convergencia de la solución.
- No está restringido por el criterio de estabilidad de Courant (CFL), lo cual asegura la estabilidad del modelo.

El flujo **bidimensional**, denominado así porque se produce en todas las direcciones de un plano (caso de las superficies sobre las que se mueve el agua de la precipitación o de las avenidas modelizadas) se resuelve mediante la utilización de una malla de elementos triangulares que abarca toda la superficie en la que se va a modelizar el flujo. Dicha malla se apoya sobre el modelo del terreno empleado, disponiendo cada elemento triangular con solera igual a la media de las cotas de los vértices, de manera que el fondo es horizontal.

Las ecuaciones de energía del agua se resuelven asumiendo que se trata de un flujo poco profundo y plano. De este modo, cada elemento de la malla tiene, en todo su prisma de agua (producto de su superficie ZB por su calado h) la misma velocidad V.

A continuación se van a describir todos los pasos que se han seguido para la obtención de los mapas de calados y velocidades para los diferentes periodos de retorno en el área de estudio. Utilizando el modelo numérico InfoWorks ICM.

3.1.5.1. Caracterización de la geometría, MDT y malla de cálculo

El primer paso en el cálculo bidimensional exige la correcta caracterización geométrica de la zona de estudio. Esto se consigue mediante la definición previa de una serie de elementos triangulares o rectangulares, que conforman la malla de cálculo. Esta malla tiene que tener una precisión suficiente para una adecuada definición de la zona de estudio y una correcta representación de las condiciones del flujo. En este sentido hay que hacer referencia, en primer lugar, a la información topográfica, que es básica para la realización del estudio y el análisis del comportamiento hidráulico.

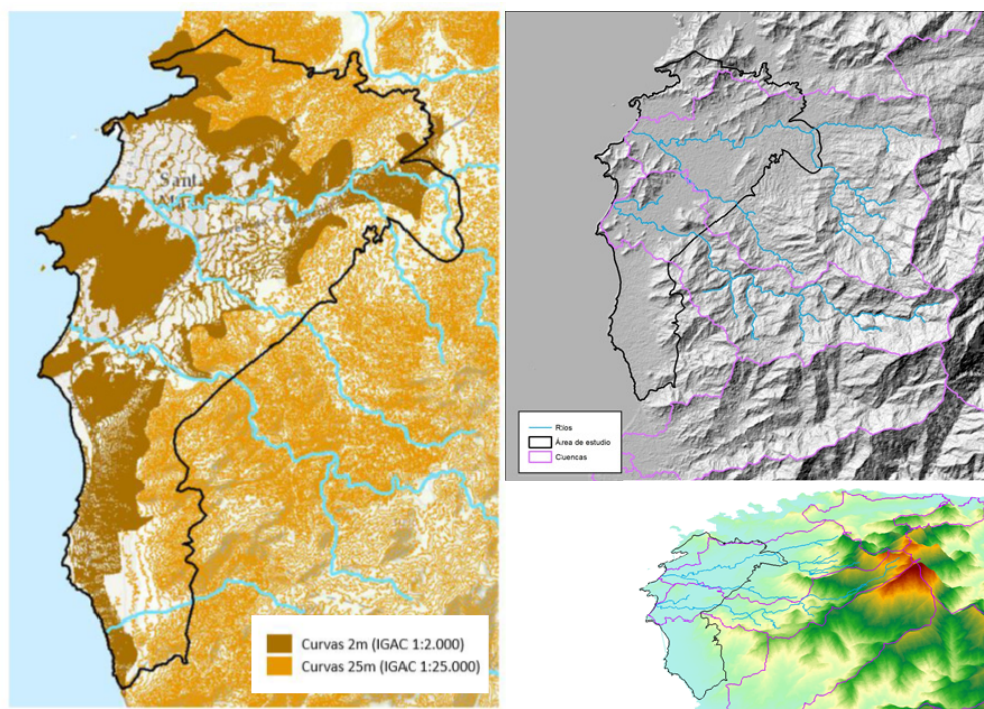


Figura 3.8. Información topográfica en la zona de estudio: a) información de detalle y b) información de satélite ASTER (arriba: vista 2D; abajo: vista 3D).

En este caso, se dispone de información topográfica de detalle (curvas 2 m, 25 m y puntos de fotogramétricos) procedente del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) que abarca más de los 150 km² del área de estudio, entorno metropolitano de Santa Marta, y del MDT obtenido del satélite ASTER de 30x30 m de resolución, para la caracterización de las cuencas vertientes a la ciudad (Figura 3.8).



Figura 3.9. Ejemplo de cartografía 1:2000 en la zona de estudio. Desembocadura del río Manzanares.

Como complemento a esta información general, se dispone de secciones tipo de algunos proyectos de encauzamiento fluvial, del desvío de la quebrada Tamacá y del colector-interceptor Bastidas del sector Norte de la ciudad, que atraviesa el barrio de Pescaito.

Asimismo, se dispone de ortofotos y de fotos oblicuas tomadas en campo, con las que es posible determinar o estimar la anchura de los cauces en diversos puntos, así como las dimensiones de algunas obras de canalización (*culverts*) que se han venido construyendo en los últimos años. También se ha utilizado la información batimétrica procedente de las cartas náuticas del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de Colombia, en concreto las cartas 244, 406, 407 y 844.

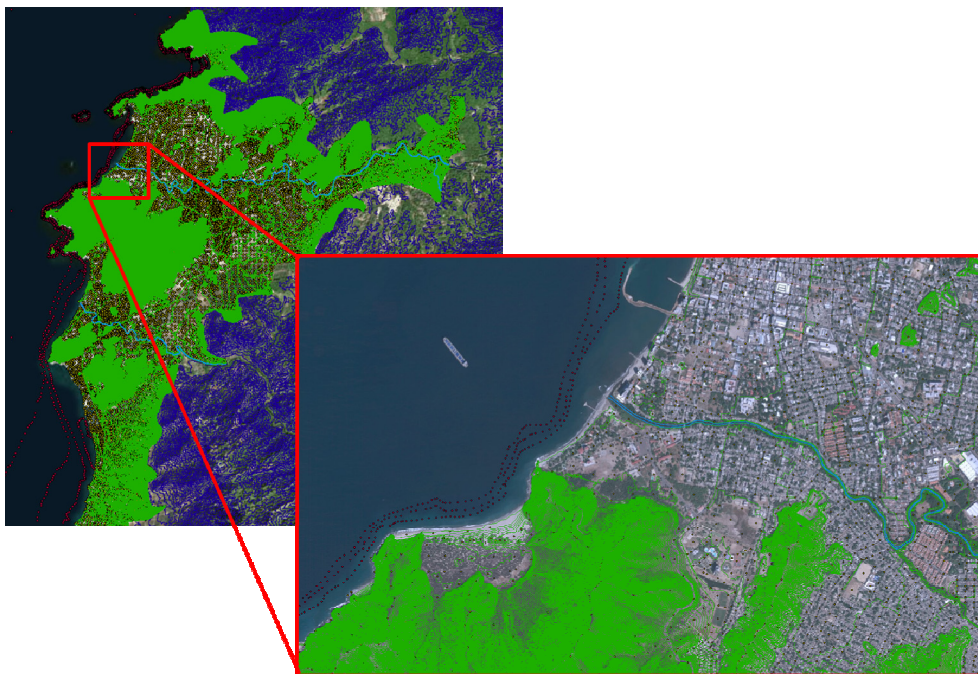


Figura 3.10. Curvas de nivel, puntos fotogramétricos, línea de costa y puntos batimétricos utilizados. Se muestran estos datos sobre la ortofoto de la zona de estudio.

Con esta información (véase figura 3.10), se ha realizado un modelo del terreno TIN (Triangulated Irregular Network) mediante técnicas GIS. El MDT generado tiene una superficie estimada de 200 Km² cubriendo la zona de estudio definida anteriormente. En la figura 3.10 se muestran parte del conjunto de datos altimétricos utilizados y en la figura 3.11 el modelo TIN generado.

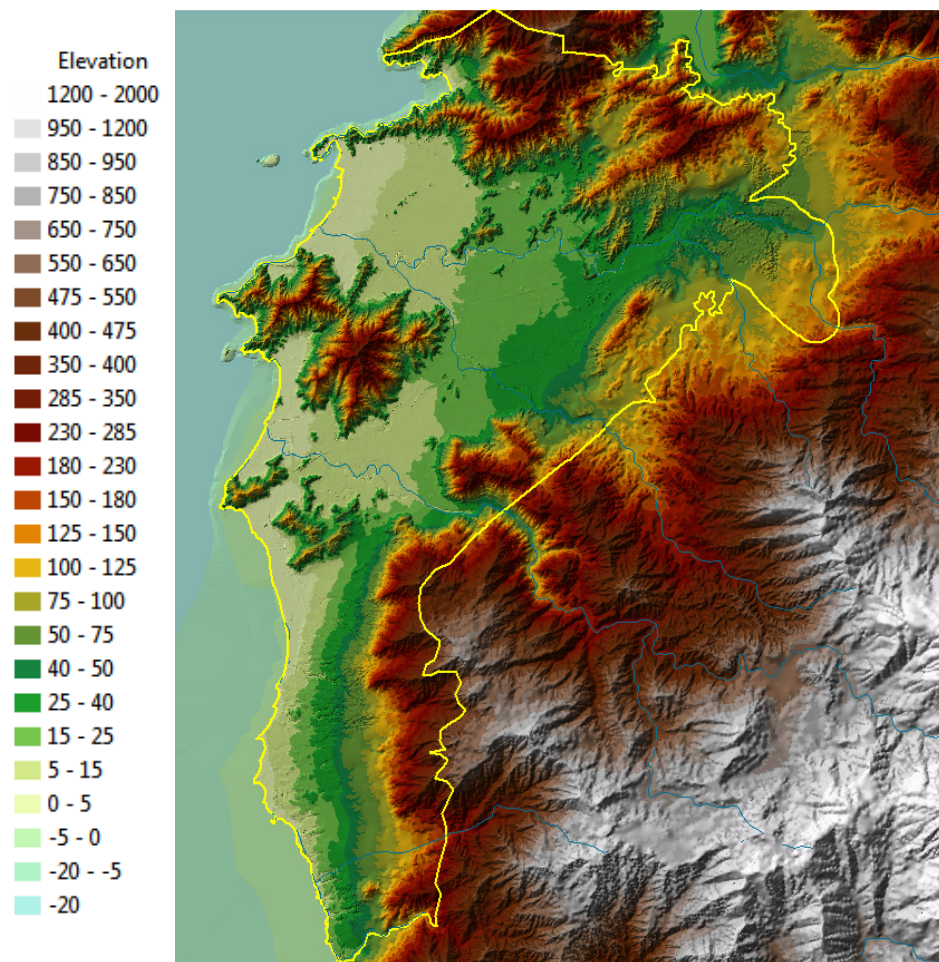


Figura 3.11. MDT triangular generado con los datos disponibles. En amarillo se establece el área estudio.

Este modelo TIN incluye modificaciones con diferentes objetivos: principalmente, se ha procedido a la mejora de los fondos de los cauces para una mejor caracterización de los mismos (empleando datos de otros estudios) y se han agregado los principales colectores y desvíos del área de estudio (colector Bastidas, colector de la Avd. del Ferrocarril, desvío de la quebrada Bureche al río Gaira, véase la figura 3.12).

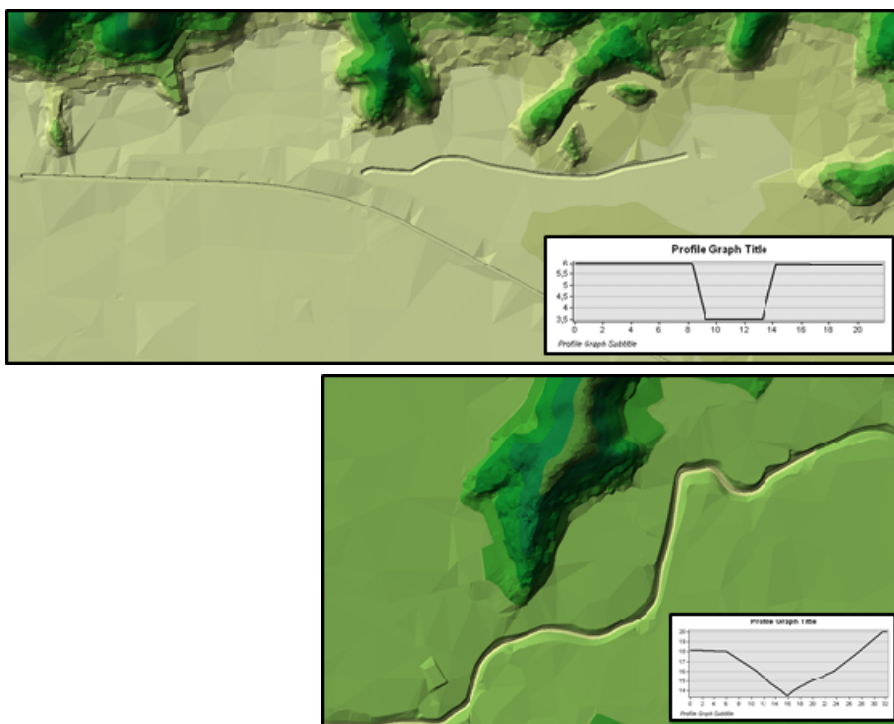


Figura 3.12. Imágenes de detalle MDT. Perfil y planta del colector bastidas (arriba); sección y planta de un tramo del río Manzanares (abajo).

A partir del MDT, se ha generado con el modelo InfoWorks una malla numérica en formato vectorial TIN (Triangulated Irregular Network) para realizar el cálculo bidimensional para cada una de las zonas. Esta malla abarca una superficie de unos 200 km², y está conformada por más de 2,200,000 de elementos. Para ello se ha realizado un mallado sensible a la altimetría del MDT con elementos de 200 m² a 50 m². Para las zonas

de especial interés se han realizado unas zonas de malla de detalle donde los elementos disminuyen su área hasta los 5 m², de modo que es posible caracterizar de forma razonable los cauces de los ríos y fondos de los colectores y desvíos. En la figura 3.13 se presentan los límites de estas zonas y detalles de la disposición de los elementos triangulares de diferentes tamaños.

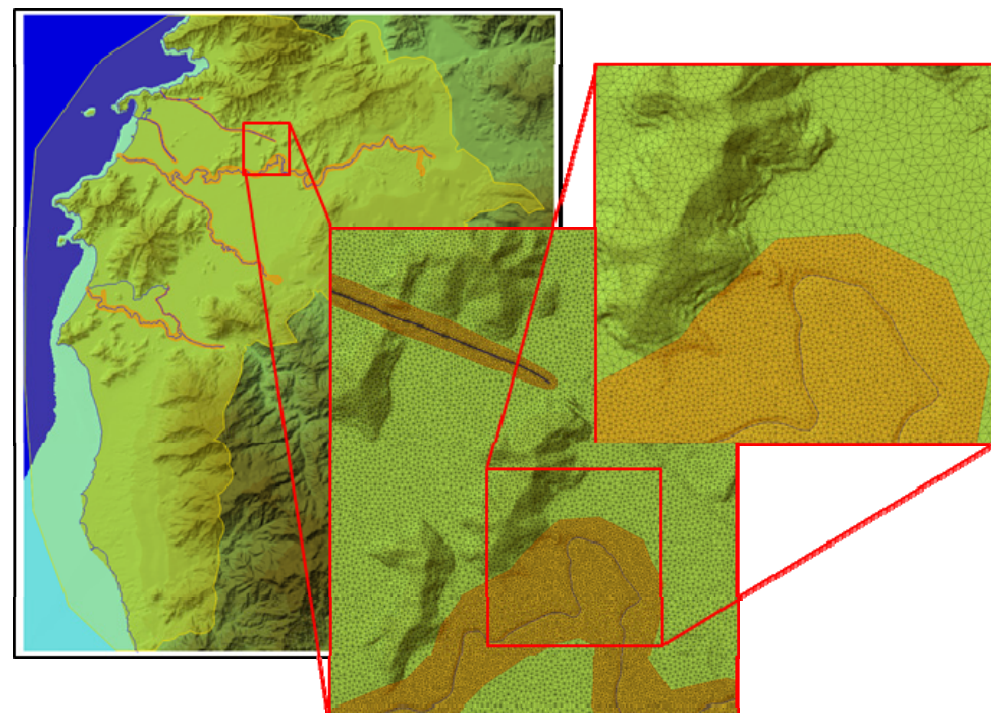


Figura 3.13. Detalle de la densidad de elementos de la malla numérica, en color naranja se presentan las zonas de mayor densidad de elementos que corresponden con cauces, llanuras de inundación, colectores y desvíos.

3.1.5.2. Caudales, precipitaciones de cálculo y condiciones de contorno

Como se ha indicado anteriormente, el cálculo hidrológico de la transferencia lluvia-caudal se puede realizar en la malla de estudio directamente con el modelo InfoWorks ICM. No obstante, puesto que el modelo digital del terreno encargado no abarca por completo la extensión de las cuencas vertientes en ninguna de las dos zonas del área consolidada, se ha realizado un estudio hidrológico (aguas arriba de ambas zonas de estudio), donde se caracterizan los caudales en régimen natural que se incorporan al área consolidada provenientes de las diferentes cuencas vertientes a partir de los datos de precipitaciones extremas (curvas IDF) que se detallan anteriormente.

En este sentido, tras un proceso iterativo en relación con el establecimiento de los límites de la propia malla, y con el doble objetivo de que queden recogidos todos los aportes al área del modelado bidimensional sin que se produzca duplicidad de estas aportaciones por el propio modelado de la transferencia lluvia-caudal, se han determinado cuatro puntos de entrada de caudales, cuyas cuencas vertientes se presentan en la figura 3.14.

a) Cálculo de caudales de aportación en régimen natural

Para la determinación de los caudales de aportación en régimen natural en situación actual para los diferentes periodos de retorno, se ha empleado el modelo Hec-Hms ("Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System") desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de EE.UU, ampliamente empleado para simular procesos de transformación precipitación-escorrentía en sistemas fluviales. A continuación se describen brevemente los aspectos más relevantes del análisis realizado:

Modelo de cuenca

El primer paso lo constituye la implementación en el modelo de las diferentes subcuencas, cuya característica principal es la superficie vertiente, para las dos zonas (Figura 3.15).

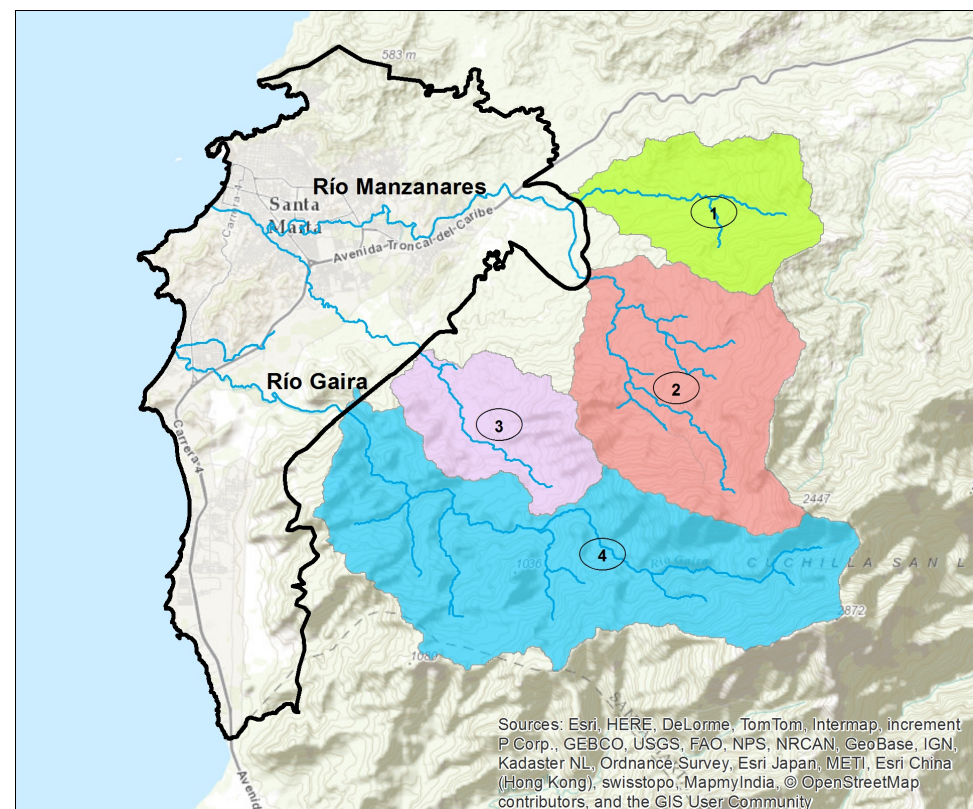


Figura 3.14. Cuencas vertientes al área de estudio para el cálculo de caudales.

A continuación se determinan las pérdidas por infiltración mediante el método del Número de Curva (*Soil Conservation Service, 1964*). Se han aplicado valores de Número de Curva para la condición de humedad antecedente tipo II y suelos del grupo hidrológico C. Como base para la obtención del número de curva se ha utilizado un mapa de usos del suelo proporcionado por IDEAM (Figura 3.16).

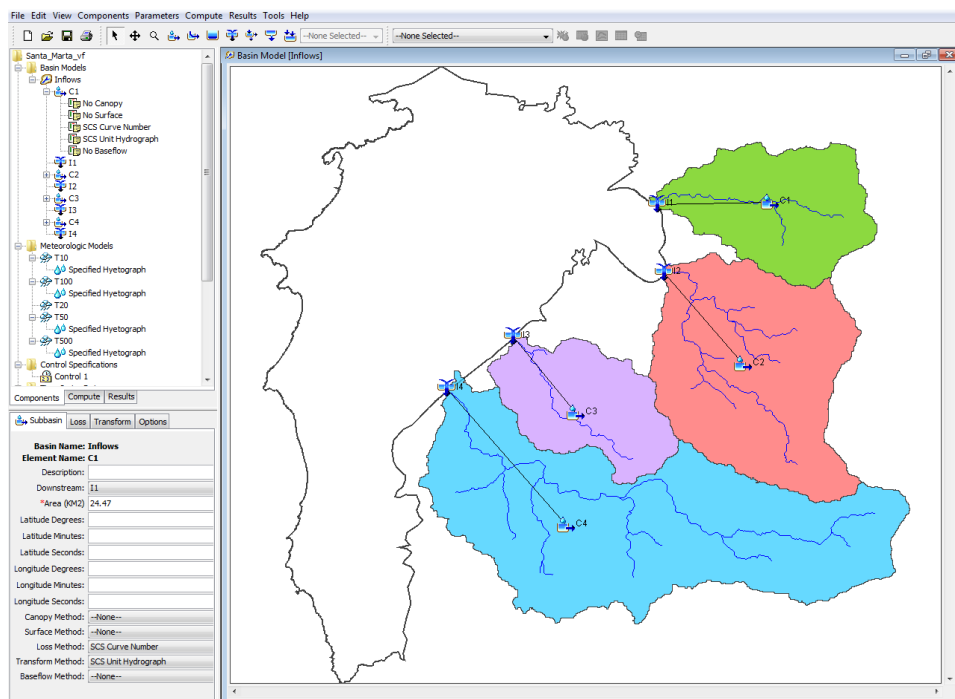


Figura 3.15. Esquemas de conceptualización de las subcuencas en el modelo HEC-HMS.

SUBCUENCA	SUPERFICIE [KM ²]
1	24.47
2	49.50
3	22.48
4	81.88

Tabla 3.5. Superficie vertiente de cada subcuenca.

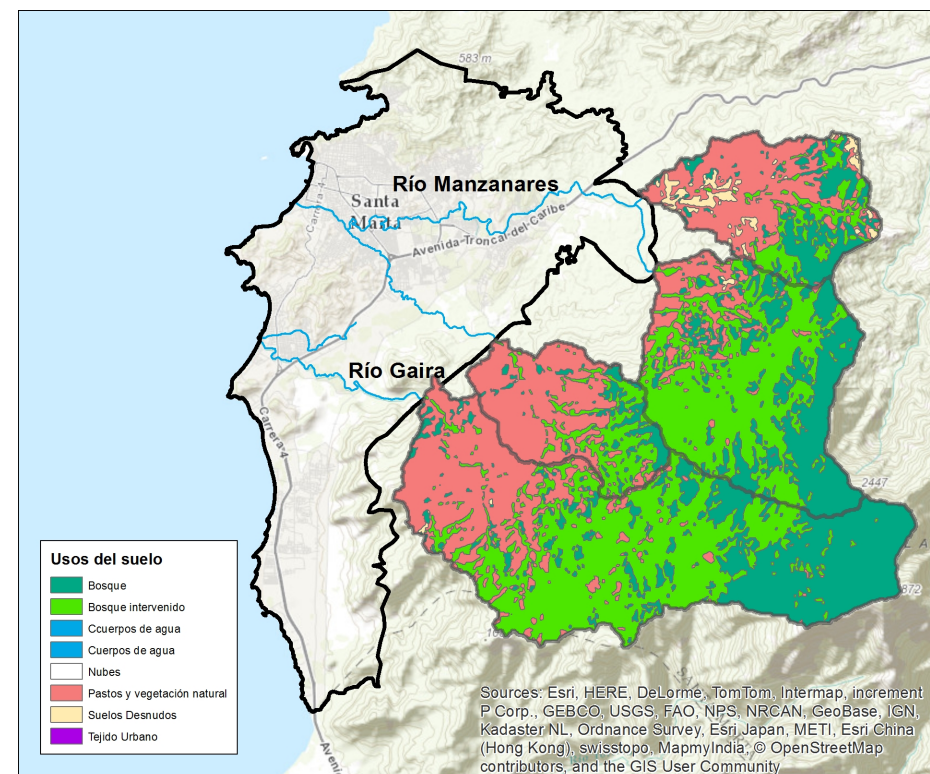


Figura 3.16. Usos del suelo en las cuencas vertientes al área de estudio.

Los parámetros de entrada al modelo son: número de curva (CN-II) y abstracción inicial (I_a) ((Ec. 1). Los valores de dichos parámetros se resumen en la tabla 3.6.

SUBCUENCA	CN II	I _a [MM]
1	79	13.5
2	79	13.5
3	79	13.5
4	78	14.3

Tabla 3.6. Número de Curva (CN) empleado en cada subcuenca.

$$I_2 = 0.2 \left(\frac{23400}{CN} - 234 \right) \quad (\text{Ec. 1})$$

El método utilizado para establecer la transformación lluvia-caudal es el hidrograma unitario del SCS (Soil Conservation Service, 1985). En la tabla 3.7 se presentan los valores de los tiempos de concentración (T_c) de cada subcuenca, determinados mediante la fórmula de Temez (1978) ((Ec. 2) y los valores del único parámetro requerido por el método, el tiempo de retardo (T_{lag}) ((Ec. 3).

$$T_c = 0.3 \left(\frac{L}{I^{0.775}} \right)^{0.775} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$T_{lag} = 0.6 T_c \quad (\text{Ec. 3})$$

Siendo:

T_c : tiempo de concentración [h]

T_{lag} : tiempo de retardo [h]

L : longitud del cauce principal de la subcuenca [km]

I : pendiente media del cauce principal [m/m]

SUBCUENCA	L [KM]	I [M/M]	T_c [MIN]	T_{LAG} [MIN]
1	8.5	0.044	165.7	99.4
2	10.4	0.114	160.8	96.5
3	8.1	0.050	156.7	94.0
4	23.7	0.082	321.1	192.7

Tabla 3.7. Tiempo de retardo (T_{lag}) y variables necesarias para su determinación.

Modelo Meteorológico

Para la implementación de las precipitaciones en el modelo HEC-HMS para la evaluación de la amenaza en situación actual se han empleado las curvas IDF definidas que han sido definidas anteriormente.

No obstante, en el presente estudio se plantea la realización de los cálculos hidráulicos tanto en régimen permanente, considerando caudales máximos constantes (del lado de la seguridad), como en régimen no permanente. Para esto último es necesario definir los hietogramas de diseño para los diferentes tiempos de recurrencia considerados (10, 20, 50, 100 y 500 años).

Las duraciones de precipitación utilizadas para el cálculo hidráulico dependen del tiempo de concentración de la cuenca en estudio. En este caso, tras una serie de análisis para intentar aproximar los resultados a la realidad esperable del comportamiento de las precipitaciones en la zona, se ha adoptado una duración de la precipitación de cálculo para las subcuencas 1, 2 y 3 de tres horas y de cinco horas para la subcuenca 4, duraciones correspondientes al tiempo de concentración de las mismas.

A modo de ejemplo de estos resultados se presentan en la figura 3.17 los dos hietogramas de diseño correspondientes a un evento de $T=100$ años.

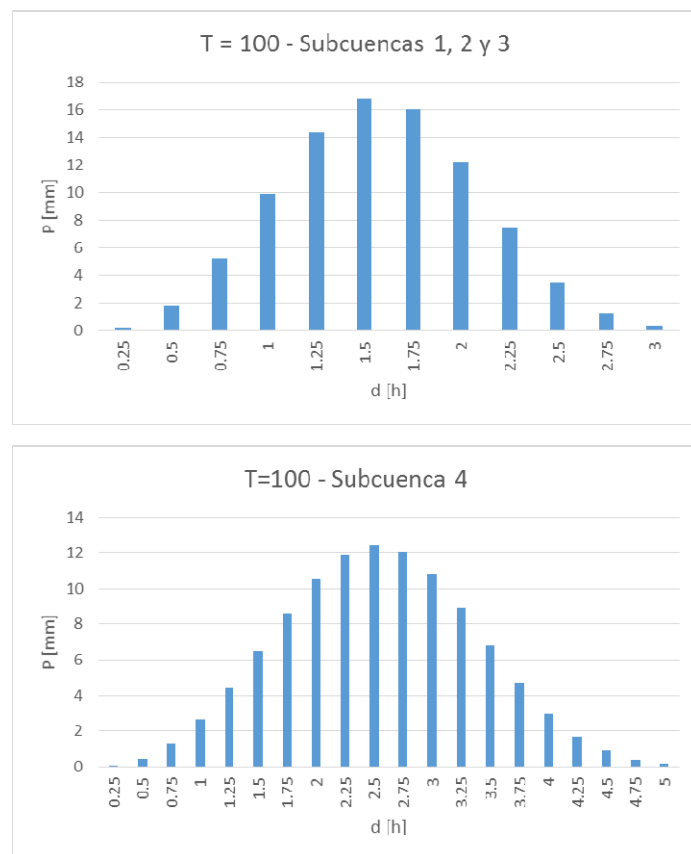


Figura 3.17. Hietogramas de diseño para un evento de 100 años de periodo de retorno.

Resultados

Como resultados de la aplicación del modelo HEC-HMS se obtienen los hidrogramas de salida de cada una de las subcuencas para los diferentes periodos de retorno analizados.

A modo de resumen de estos resultados en la figura 3.18 se presentan los hidrogramas correspondiente a un evento de $T=100$ años para todas las subcuencas y en la figura 3.19 se presentan los caudales máximos obtenidos para cada subcuenca y periodo de retorno.

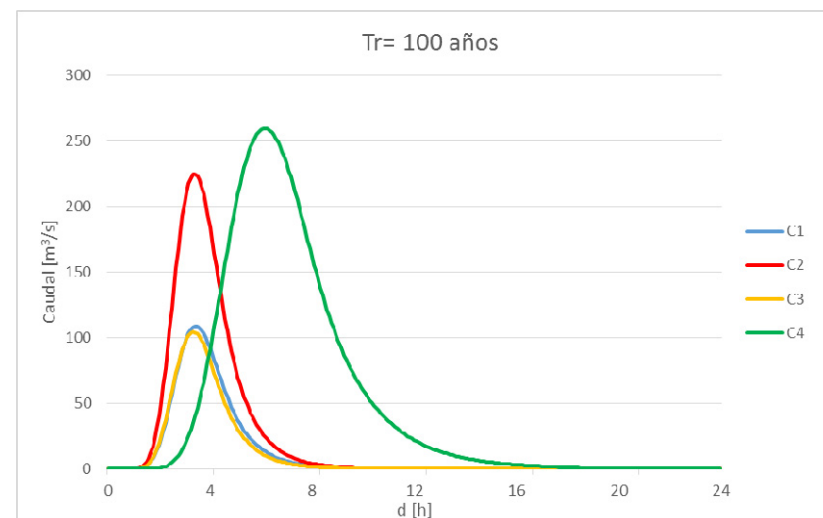


Figura 3.18. Hidrogramas de diseño para un evento de 100 años de periodo de retorno.

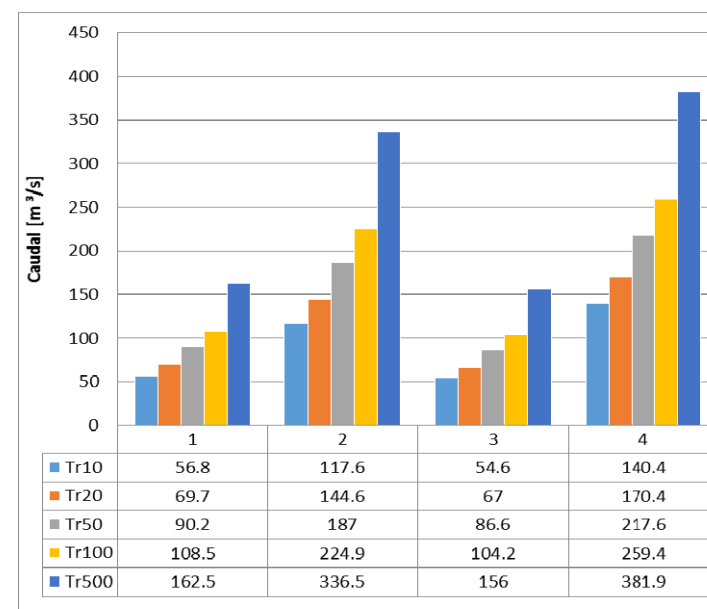


Figura 3.19. Caudales máximos en las subcuencas para diferentes periodos de retorno.

Los resultados de los caudales obtenidos han sido calibrados para la situación actual con datos de caudales de los dos afluentes de Bonda y Minca proporcionados por el IDEAM.

b) Precipitaciones de cálculo

Además de las entradas directas de caudal (*inflows*) obtenidas como se detalla en el apartado anterior, en el propio modelo InfoWorks ICM se realiza el modelado de la transferencia lluvia-caudal en la malla de cálculo, para lo que es necesario obtener las intensidades de precipitación asociadas a cada periodo de retorno en esa área.

En este caso se han probado diferentes duraciones de lluvia con la distribución de su intensidad en intervalos de 30 minutos, adoptado finalmente los correspondientes a los valores de las curvas IDF de la estación pluviométrica de Minca de duración de la precipitación de 3 horas que coincide de forma aproximada con el tiempo de concentración en la propia malla.

Periodo de retorno	I max [mm/h]
Tr10	43.9
Tr20	48.8
Tr50	56.14
Tr100	62.41
Tr500	79.82

Tabla 3.8. Intensidades máximas (mm/h) para una duración de 3 horas.

A modo de ejemplo de estos resultados se incluye el hietograma de diseño correspondiente a un evento de T=100 años y duración 3 horas.

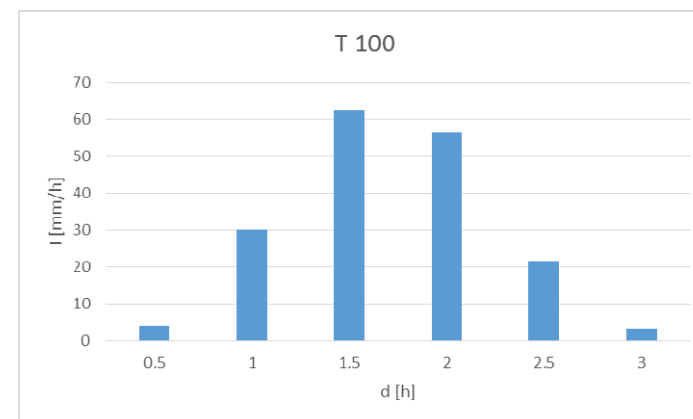


Figura 3.20. Lluvia distribuida T100 para evento de 3 horas.

c) Parámetros de caracterización del terreno

Para el cálculo de la hidrología 2D directamente sobre la malla bidimensional, es necesario determinar un valor del coeficiente de escorrentía para cada zona de infiltración definida. Estas zonas de infiltración se han establecido a partir de la información sobre cobertura vegetal y usos del suelo disponible en formatos digitales. En la Figura 3.25 se presentan los diferentes usos del suelo y tipos de vegetación en el área de estudio para la situación actual.

Para la caracterización de los diferentes elementos de la malla desde el punto de vista hidráulico, se han considerado estas mismas tipologías, definiendo para cada una de ellas un valor del coeficiente de rugosidad de Manning y un coeficiente de escorrentía. Además el coeficiente de escorrentía engloba las pérdidas referentes a la transferencia lluvia caudal que es especialmente sensible a la intensidad de la precipitación y por lo tanto al tipo de evento simulado. Por este motivo se han seleccionado dos tipos de coeficiente de escorrentía diferentes en función de la severidad del evento. Para los eventos menos frecuentes con periodos de retorno de al menos 50 años se han aplicado unos coeficientes de escorrentía que son aproximadamente un 20% mayores que los utilizados para el resto de eventos simulados. En la tabla 3.15 se incluyen los valores utilizados para cada una de las tipologías de terreno empleadas.

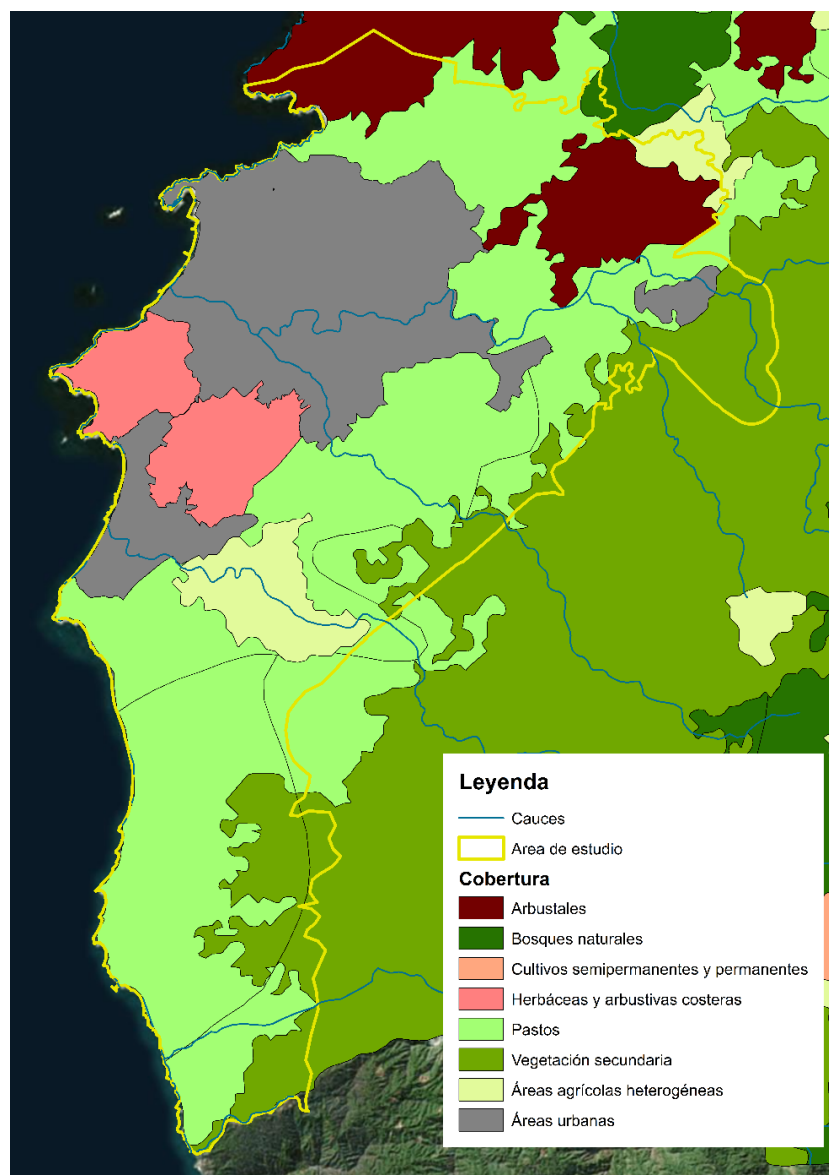


Figura 3.21. Usos del suelo y tipos de vegetación en el área de estudio donde se enmarca la zona 2D.

Tipo	Coefficiente de escorrentía	Coefficiente de escorrentía para eventos $\geq T50$	Rugosidad (n de Manning)
Arbustales	0.4	0.5	0.055
Áreas agrícolas heterogéneas	0.5	0.6	0.04
Áreas urbanas	0.6	0.75	0.075
Bosques naturales	0.35	0.4	0.065
Bosques plantados	0.35	0.4	0.065
Cultivos semipermanentes y permanentes	0.5	0.6	0.04
Herbáceas y arbustivas costeras	0.4	0.5	0.055
Pastos	0.4	0.5	0.045
Vegetación secundaria	0.4	0.5	0.055

Tabla 3.9. Coeficientes de escorrentía y de rugosidad de Manning para diferentes usos del suelo y vegetación.

d) Condiciones de contorno

Como condición de contorno en los límites de la malla de cálculo se ha adoptado el calado normal correspondiente al caudal circulante en esos elementos de la malla para cada uno de los periodos de retorno analizados. A excepción de los contornos donde se ha declarado la entrada del caudal obtenido del estudio con HEC-HMS y zona de malla costera situada sobre el mar, donde se ha declarado una condición de nivel constante con el fin de simular un nivel medio de marea.

3.1.5.3. Resultados

Tras la simulación mediante el modelo InfoWorks ICM se han obtenido unos resultados preliminares de la inundación para los eventos de cálculo, a continuación se incluye un breve resumen de los resultados parciales obtenidos, con objeto de tener una visión fácilmente interpretable del comportamiento del flujo y de las repercusiones, en términos de inundación en el área de estudio.

A modo de resumen de los resultados más destacados, en las figuras siguientes se presentan los mapas correspondientes a los valores máximos de calados y velocidades para las avenidas de 20 años de periodo.

De forma general, en la figura 3.22 puede observarse como los calados en las llanuras de inundación son en su mayoría menores a 1 m encontrando solo calados pronunciados en las zonas cercanas a las cauces donde estos pueden llegar a sobrepasar los 2 m en zonas puntuales donde el terreno presenta gargantas, depresiones u otro tipo de accidente.



Figura 3.22. Resultados de Calado (m) para T20. Vista general (escala 1:50000 en el original).

En cuanto a las velocidades, de forma general puede observarse que en los únicos puntos donde la velocidad sobrepasa los 1.5 m/s es en determinadas secciones del cauce de los ríos. El resto de zonas de inundación presentan unas velocidades en torno a 0.6-0.8 m/s disminuyendo paulatinamente según nos alejamos del eje de los cauces (véase figura 3.23).

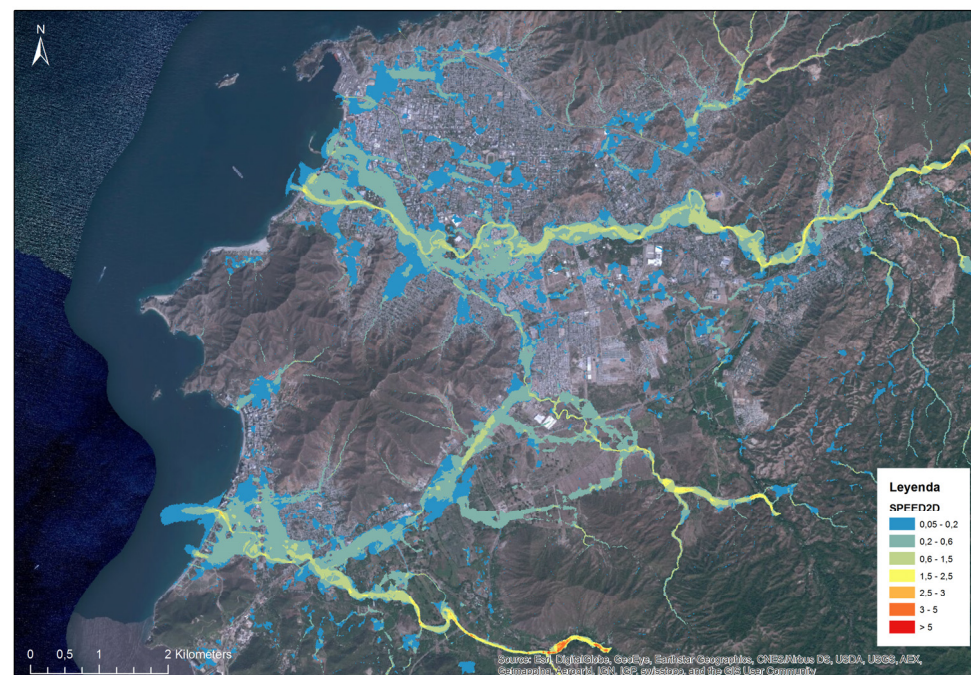


Figura 3.23. Resultados de Velocidades (m/s) para T20. Vista general (escala 1:50000 en el original).

También, a modo de ejemplo se presenta en las figuras 3.24 y 3.25 una vista de mayor detalle de las zonas urbanas por donde discurren el río Manzanares y el río Gaira. En la figura 3.24 podemos observar que los mayores calados (>5 m) del río Manzanares dentro de la zona urbana se localizan en las zonas inmediatamente próximas al cauce y únicamente algunas zonas localizadas cerca del cerro Ziruma entre Rodadero y Santa Marta presentan inundaciones pero de menor entidad (~0.5 m) en la zona cercana a la costa. También cabe destacar los calados medios observados en el barrio de Pescaito son cercanos a 0.5 m.

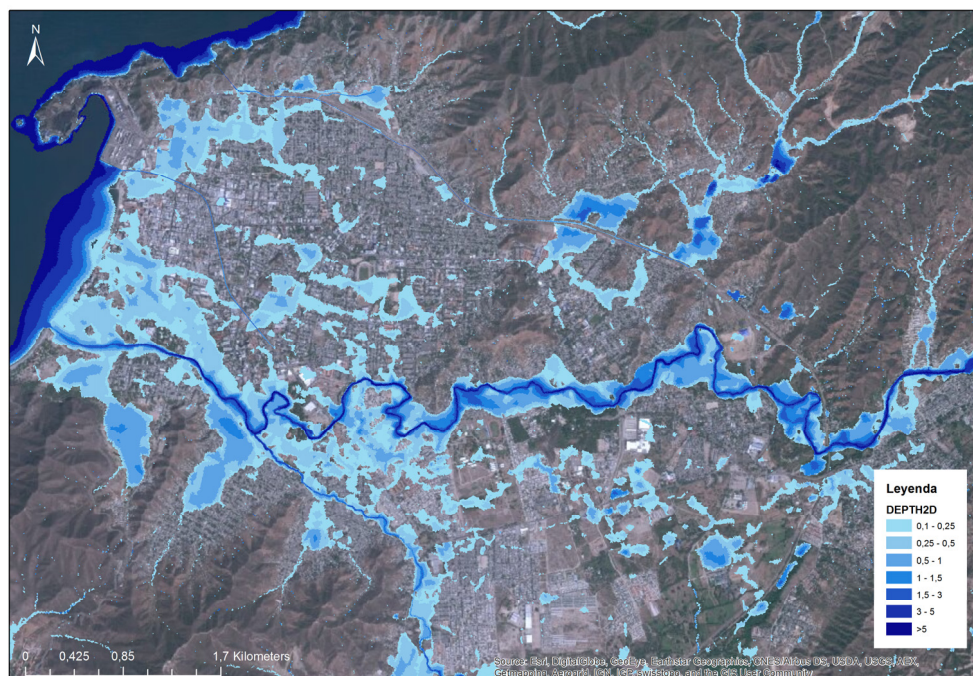


Figura 3.24. Resultados de Calado (m) para T20 en el entorno del Río Manzanares y colector Bastidas.

En la figura 3.25 se presenta la zona del río Gaira donde podemos observar nuevamente como las mayores inundaciones se producen en las zonas cercanas al cauce principal. Además se observa como el desbordamiento del río Gaira a la altura de la calle 18, produce la inundación del tramo aguas arriba donde se recogen calados puntuales de hasta 3 m en las proximidades del cauce.

Otra zona de especial interés es el desvío realizado desde la quebrada de Bureche al río Gaira. En esta zona, cerca de su conexión con la quebrada, el MDT refleja un área de zonas bajas en las que se registran calados superiores al 1.5 m.

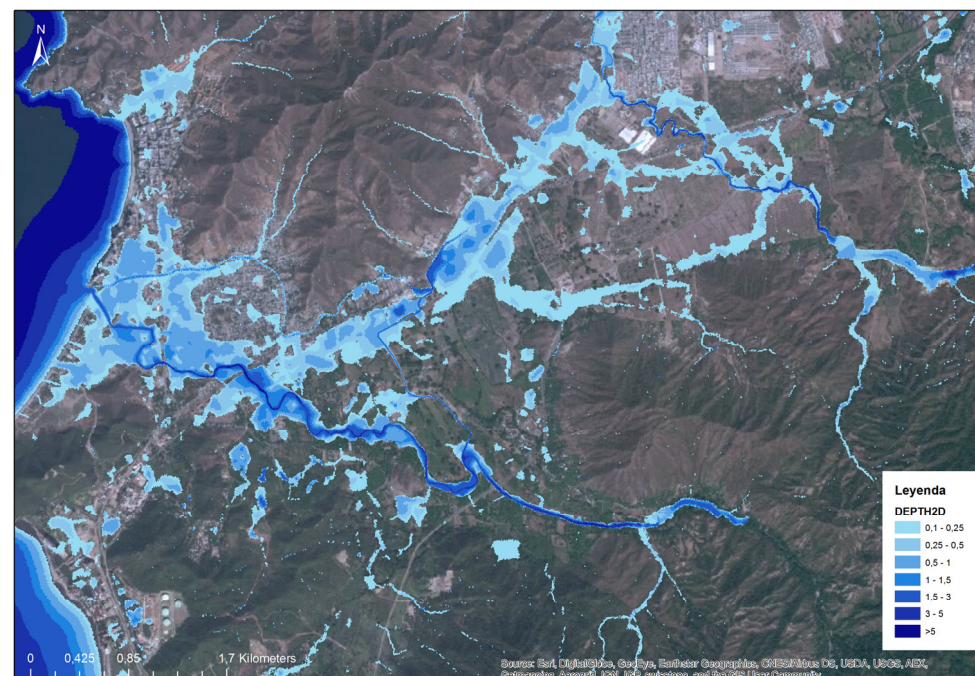


Figura 3.25. Resultados de Calado (m) para T20 en el entorno del Río Gaira y la quebrada de Bureche.

Por último, los resultados correspondientes al periodo de retorno de 20 años han sido validados contra el levantamiento GPS (niveles y áreas de inundación) realizado por METROAGUA, tras el evento de inundación sucedido en el año 2011. Como puede observarse en la figura 3.26 el modelo refleja zonas inundadas casi en la totalidad de áreas registradas en el levantamiento, deduciendo que el comportamiento del modelo es adecuado.

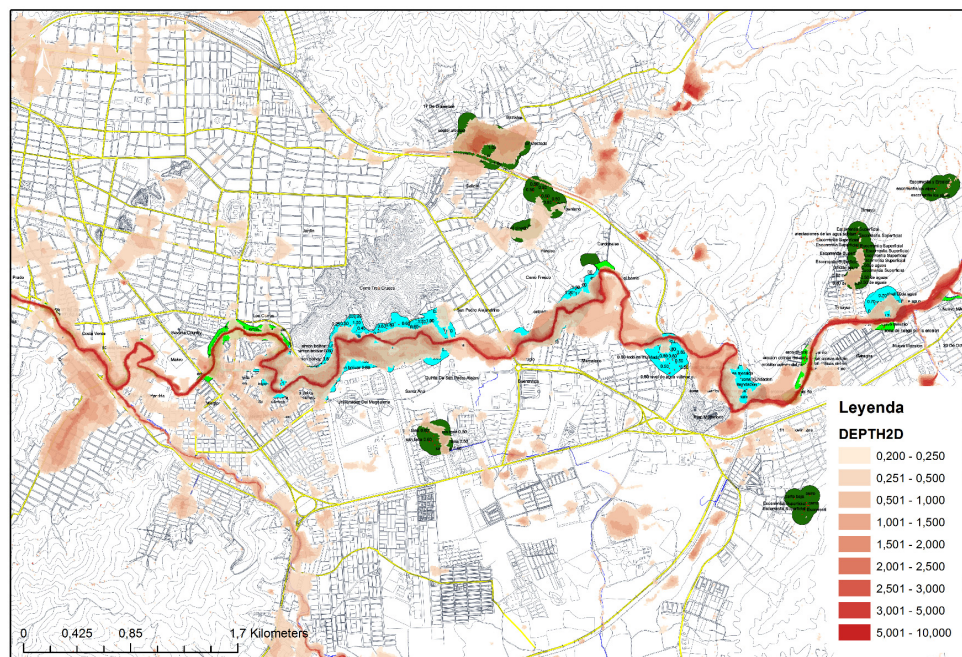


Figura 3.26. Resultados de calados (m) para el evento de inundación con periodo de retorno de 20 años. Los resultados están representados sobre el levantamiento de las zonas inundadas realizado por METROAGUA tras las inundaciones del año 2011.

4. EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN

En este capítulo se presenta el análisis y los resultados de la exposición, que constituye una de las variables que determinan el riesgo, tal y como refleja el marco metodológico presentado en el capítulo 2. De forma general, y siguiendo la terminología de UNISDR (2009) la exposición se define como la población, las propiedades, los sistemas u otros elementos presentes en las zonas donde existen amenazas y por ello susceptibles a experimentar pérdidas potenciales. En este caso concreto se analiza la exposición de los elementos de la zona de estudio frente a la inundación fluvial.

En este contexto y teniendo en cuenta el enfoque del presente trabajo, centrado en el riesgo de pérdidas económicas debido al daño en edificaciones e infraestructuras críticas y el daño en la población debido a la afectación y pérdida estimada de vidas humanas, la evaluación de la exposición se realiza en dos dimensiones: (i) exposición física (edificaciones e infraestructuras críticas) y (ii) exposición humana (población). Este análisis se desarrolla en los apartados 4.1 y 4.2 respectivamente.

En primer lugar se muestra el inventario y caracterización de los elementos presentes en Santa Marta para cada una de las dimensiones y posteriormente se muestran el análisis de su exposición a la inundación fluvial para los diferentes períodos de retorno.

Una vez inventariados y caracterizados los elementos que se encuentran expuestos a la inundación, en el capítulo 5 se analizará su vulnerabilidad frente a inundaciones, como paso previo a la obtención de los daños.

4.1 Exposición física a inundaciones en la situación actual y en el escenario tendencial 2050.

El análisis de la exposición física (edificaciones e infraestructuras críticas) frente a la amenaza de inundación en la zona de estudio se realiza considerando: (i) la situación actual y (ii) el escenario tendencial para el año 2050. Se estructura en los siguientes epígrafes:

- Inventario de edificaciones en la zona de estudio (4.1.1).
- Inventario de infraestructuras críticas en la zona de estudio (4.1.2).

- Exposición de las edificaciones expuestas a la amenaza de inundación (4.1.3).
- Exposición de las Infraestructuras críticas a la amenaza de inundación (4.1.4).

4.1.1. Inventario de edificaciones en la zona de estudio

A continuación se identifican y describen las edificaciones residenciales presentes en la zona de estudio, sin tener en cuenta la extensión de la amenaza, siguiendo la siguiente estructura:

1. En primer lugar se establece una clasificación de edificaciones en función de su calidad constructiva.
2. A continuación se inventarían las edificaciones según la clasificación establecida y se analiza su distribución geográfica en la situación actual.
3. Finalmente se realiza el inventario y el análisis de las edificaciones para el escenario futuro tendencial para el año 2050.

Establecimiento de clases de edificaciones

Las edificaciones se clasifican en cuatro categorías en función de su calidad constructiva. Para ello se han empleado como unidades de análisis las unidades morfológicas homogéneas o clases de análisis descritas en la componente 3 de desarrollo urbano del proyecto.

Estas unidades homogéneas aportan información sobre el nivel socioeconómico de la población, tipología edificatoria y acceso a servicios de abastecimiento y saneamiento básicos. Esta información, junto con un análisis de fotointerpretación y el trabajo de campo desarrollado, permite asociar el nivel socioeconómico a una calidad constructiva tipo determinada (Tabla 4.1). Esta asociación permite realizar el análisis sin disponer de datos a un mayor nivel de detalle.

Clase socioeconómica	Calidad constructiva
Alta	A
Media	B
Baja	C
Precaria	D

Tabla 4.1 Relación entre clase socioeconómica y categorías de calidad constructiva.

Las cuatro categorías de calidad constructiva se describen brevemente a continuación:

Categoría A (calidad constructiva alta):

- Cuentan con todos los servicios de infraestructura básica: energía eléctrica, agua entubada y drenaje.
- Edificaciones con piso, techo y paredes de materiales resistentes y de gran calidad. Presentan estructuras con diseño.
- Dentro de esta categoría se pueden encontrar tipologías edificatorias unifamiliares y multifamiliares que varían en número de altura. También se enmarcan en esta categoría los edificios dedicados a comercio, servicios e instituciones de alta calidad constructiva existentes en algunos de los barrios con usos mixtos.
- Las viviendas unifamiliares disponen de zonas ajardinadas cerradas, patios o terrazas.

Categoría B (calidad constructiva media)

- Cuentan con los servicios de infraestructura básica: energía eléctrica, agua entubada y drenaje.
- Corresponde a esta categoría la vivienda edificada con materiales permanentes, resistentes y acabados de buena calidad.
- La tipología edificatoria puede ser unifamiliar, multifamiliar o una combinación de estos dos, dependiendo del barrio que tengamos en cuenta.

Categoría C (calidad constructiva baja)

- En su mayoría, cuentan con servicios de infraestructura básica.
- Edificaciones realizadas con materiales de construcción básicos que se traducen en diseños sencillos y de escasa calidad. Se construyen con materiales resistentes en paredes (normalmente bloque), no así en techos y/o cubiertas donde las láminas metálicas o de amianto/uralita son los materiales comúnmente utilizados.

- Suele corresponderse con tipologías edificatorias unifamiliares de una o dos alturas, y suelen presentar pequeños patios a la entrada de las edificaciones. Se encuadran aquí las áreas de uso mixto de calidad baja.

Categoría D (calidad constructiva muy baja o precaria)

En esta categoría se incluyen dos tipos de edificaciones:

- Edificaciones de baja calidad constructiva (categoría C) que se encuentran en un hábitat precario. Es decir, que se encuentran en zonas con vías no pavimentadas y/o no disponen de todos los servicios de infraestructura básica, como alcantarillado o red de saneamiento.
- Edificaciones de muy baja calidad constructiva en zonas informales o invasiones. Los materiales de las paredes son resistentes en las paredes (normalmente bloque), no así en techos y/o cubiertas donde las láminas metálicas o de amianto/uralita son los materiales comúnmente utilizados. El acceso a la vivienda es directo desde las vías, no existiendo patios pavimentados a la entrada de las edificaciones. Estas construcciones son generalmente fruto de la autoconstrucción. Predominan las edificaciones de una única planta.

En las siguientes imágenes se pueden ver algunas de las tipologías edificatorias que se encuentran en el área de estudio.

Categoría A:



Categoría C:



Categoría B:



Categoría D:



Figura 4.1. Imágenes de las distintas calidades constructivas en Santa Marta. Fuente: Google Maps.

Inventario de las edificaciones en la situación actual

La distribución de las diferentes clases constructivas en la zona de estudio se muestra en los siguientes gráficos (Figura 4.3). Se observa que la calidad constructiva que más superficie ocupa en el área de estudio es la de tipo baja (categoría C) seguida de la de tipo medio (categoría B). En conjunto, estas dos categorías concentran aproximadamente un 68% del área dedicada a uso residencial y agrupan a un 76% de la población.

En tercer lugar, las zonas clasificadas como precarias (D) ocupan aproximadamente un 19% del área total dedicada uso residencial, coincidiendo este porcentaje con el de la población censada en esas zonas.

Por último, la menor extensión corresponde con la calidad constructiva alta (A) con aproximadamente un 12% del área total de uso residencial. Sin embargo, estas zonas acogen a menos de un 5 % de población.

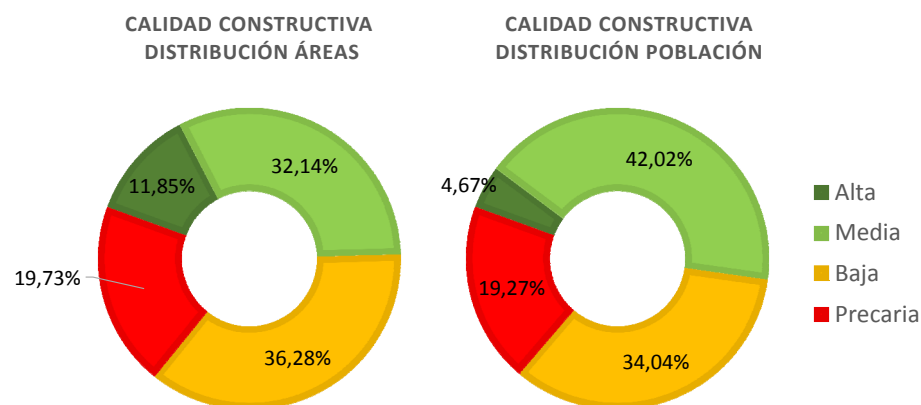


Figura 4.2. Distribución de la superficie y la población según categorías de calidad constructiva. Situación actual.

La siguiente tabla (Tabla 4.2) resume las superficies y la población por cada categoría de calidad constructiva.

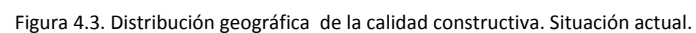
Calidad Constructiva	Ha.	% área	Población	% población
A	348,18	11,85	21.742	4,67
B	944,14	32,14	195.505	42,02
C	1.065,60	36,28	158.343	34,04
D	579,64	19,73	89.645	19,27
Total	2.937,56	100	465.235	100

Tabla 4.2. Distribución de área y población según categoría de calidad constructiva de las edificaciones. Situación actual.

En el mapa de calidad constructiva (figura 4.4) se observa que existe cierta homogeneidad en la distribución de las calidades constructivas. Así, el centro histórico de Santa Marta y los frentes costeros de Taganga, Santa Marta y Rodadero presentan principalmente calidades constructivas altas (categoría A) y medias (categoría B).

En general, los sectores de calidades constructivas baja (categoría C) y precaria (categoría D) bordean los sectores con mejores calidades, coincidiendo con zonas de expansión de la ciudad. Las zonas de calidad constructiva baja (categoría C) de mayor extensión se encuentran al sur de la zona de estudio, en los alrededores del aeropuerto Simón Bolívar, y al este de la zona de estudio, donde se localizan los barrios de Nueva Colombia, 11 de noviembre y 20 de octubre, entre otros.

Las áreas con calidades constructivas precarias (categoría D), que incluyen asentamientos informales, se concentran principalmente al noreste de Santa Marta, en la Comuna 5.



Con base en la información recopilada para el presente estudio, las infraestructuras urbanas críticas han sido identificadas, localizadas y clasificadas en categorías según el tipo de uso que se hace de ellas o el subsistema infraestructural al que pertenecen. Así, se ha elaborado una base de datos de infraestructuras críticas que cuenta con los siguientes elementos:

CATEGORIA	Nº elementos
Agua y Saneamiento	26
Comercial	17
Educación	66
Energía	2
Industrial	29
Salud	21
Servicios Urbanos	11
Transporte y comunicación	2

Como se puede observar en la tabla anterior, los elementos más abundantes dentro del inventario son los correspondientes a la categoría educación seguida de la categoría industrial y agua y saneamiento. Las categorías de energía y transporte y comunicación son las que menor número de elementos tienen.

Las infraestructuras de educación incluyen universidades, institutos e instituciones educativas departamentales (IED) que ofrecen enseñanza a diferentes edades desde pre-escolar y primaria. La siguiente figura muestra la localización de las infraestructuras críticas de Santa Marta.

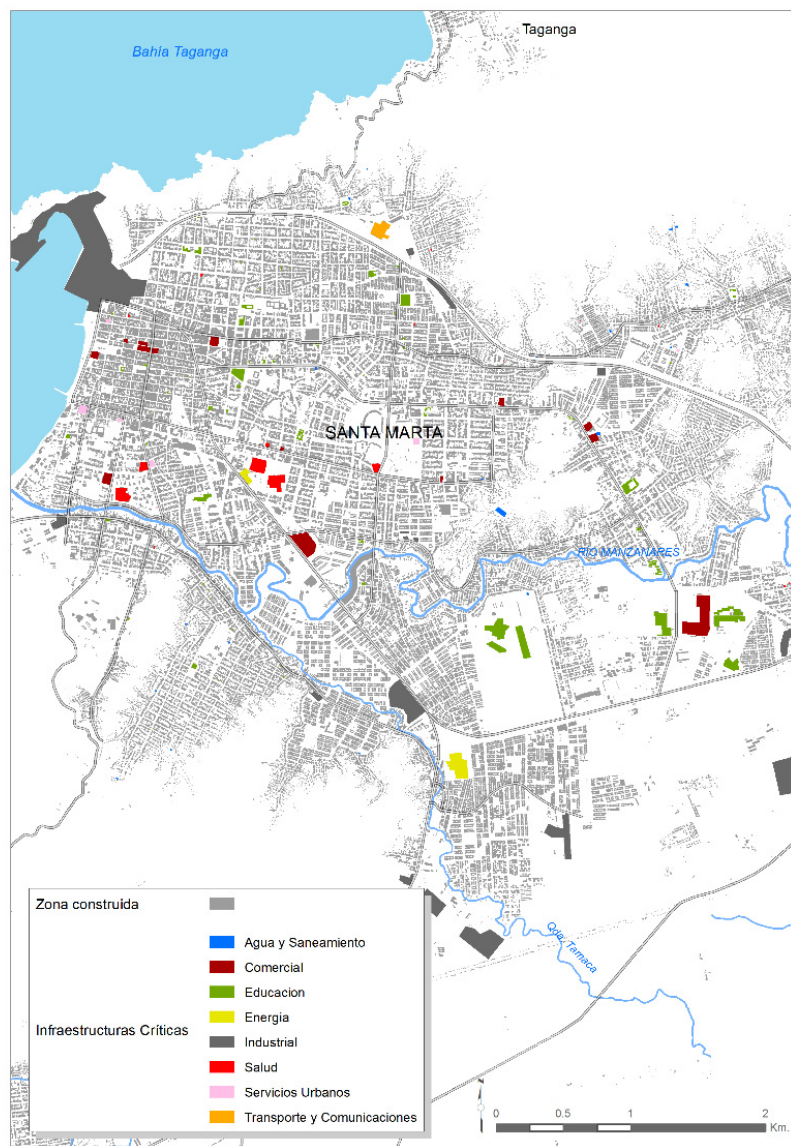


Figura 4.4. Detalle de la distribución geográfica de las infraestructuras críticas. Situación actual.

4.2 Exposición humana a inundaciones en la situación actual y en el escenario futuro tendencial 2050.

El análisis de la exposición humana a la inundación fluvial se realizará para los periodos de retorno T10 y T100, tanto en la situación actual como en el escenario tendencial del año 2050.

Para ello, y manteniendo la estructura del apartado anterior, se describe en primer lugar la distribución de la población en toda la zona de estudio, y posteriormente se analiza la exposición de la población a la amenaza.

4.2.1. Población de la zona de estudio

Considerando el censo de 2015, la población de la zona de estudio es de 465.235 habitantes, con una densidad media poblacional aproximada de 132 habitantes por hectárea.

Las mayores densidades poblacionales se dan alrededor del centro de Santa Marta y en Rodadero. No existe una relación directa entre la densidad de población y la tipología constructiva. Sin embargo, más de un tercio de la superficie total edificada coincide con zonas de calidades constructivas bajas (categoría C) o precarias (categoría D) con alta densidad poblacional, coincidiendo con las zonas de expansión de Santa Marta y Rodadero.

El siguiente mapa ilustra las densidades de población en la zona de estudio.

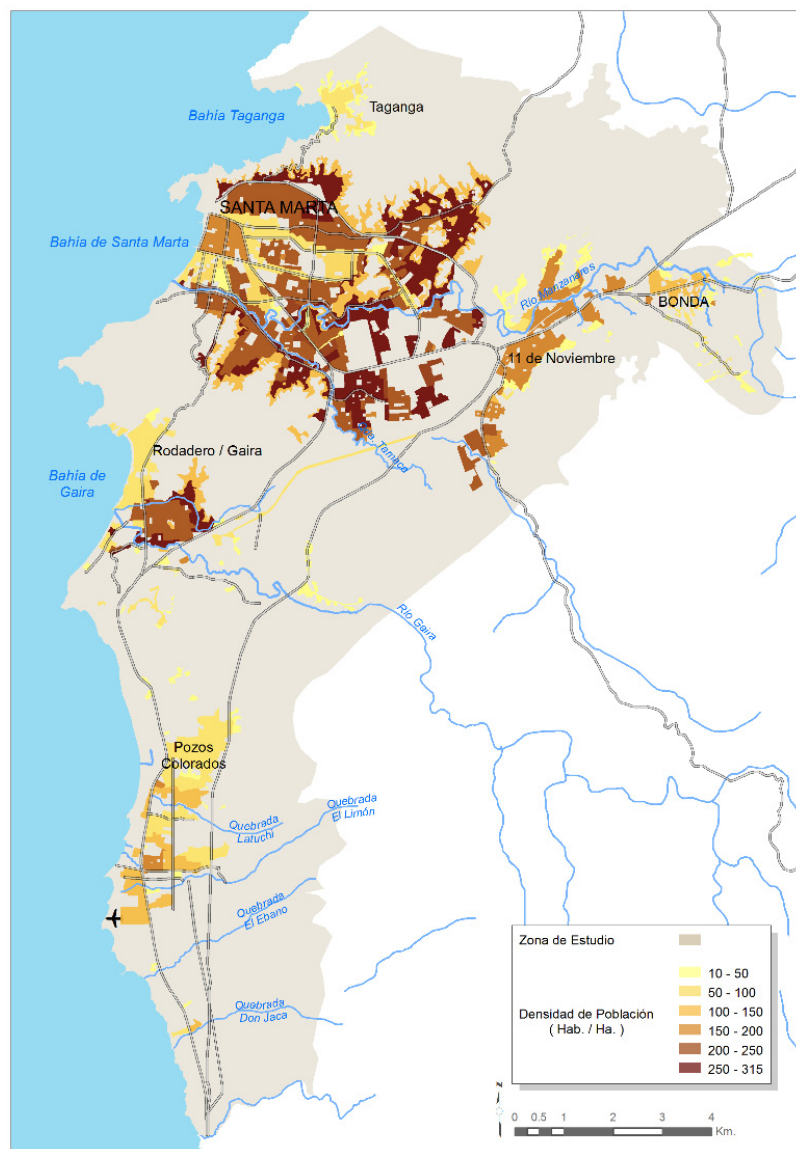


Figura 4.5. Mapa de densidad poblacional. Situación actual.



5. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD Y RIESGOS DE INUNDACIÓN EN LOS ESCENARIOS ACTUAL Y TENDENCIAL

En desarrollo. El contenido de este capítulo será objeto de la entrega del informe final.



6. PROPUESTA DE ACTUACIONES Y ANÁLISIS DE RIESGOS DE INUNDACIÓN EN EL ESCENARIO INTELIGENTE.

En desarrollo. El contenido de este capítulo será objeto de la entrega del informe final.

7. RIESGO DE ABASTECIMIENTO

7.1. Introducción y objetivos

El objetivo de este análisis es cuantificar los riesgos de abastecimiento de agua para usos urbanos en la ciudad de Santa Marta, en el marco metodológico y de objetivos de la Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles (ICES) del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Para ello, se recopilará la información existente relativa a las demandas, aportaciones y aportaciones disponibles, con el fin de hacer un balance hídrico que caracterice la situación actual y los escenarios futuros. Como resultados complementarios a la caracterización de escenarios, se establecerán de forma general las necesidades de inversiones para llegar a una situación futura adecuada desde el punto del desarrollo humano y socioeconómico (escenario inteligente o Smart), y se evaluarán las consecuencias derivadas de aplicar políticas que mantengan las tendencias recientes de crecimiento (escenario tendencial).

Este análisis de riesgos de sequía urbana se basa en numerosos estudios existentes, que se recogen en un apartado final de referencias, y tiene como objetivo aportar nuevos datos o realizar cálculos hidrológicos o de gestión de recursos detallados sólo en algunos aspectos del problema, los relacionados con la disponibilidad de recurso. Basándose en la información existente, que será parcialmente reelaborada, las aportaciones novedosas se centrarán en los siguientes puntos:

- Validar y actualizar resultados previos de oferta, demanda y balance hídrico en la ciudad, haciendo hincapié en su alta variabilidad en el tiempo. Aunque algunos de los estudios existentes han empleado series temporales para caracterizar las aportaciones, por lo general el déficit hídrico de la ciudad, u otras variables, están tratados de forma determinista, y no aleatoria, un enfoque que se pretende resaltar en este trabajo.
- Efecto potencial del cambio climático en el déficit hídrico (a través de los cambios que induce en las aportaciones y posiblemente en las demandas), también tratado de forma probabilística.
- Revisión y análisis de las medidas propuestas para resolver el déficit hídrico futuro, a la luz de la caracterización del déficit como variable aleatoria.

7.2. Descripción general del sistema de abastecimiento de agua en el área metropolitana de la ciudad de Santa Marta

La descripción del sistema que se recoge a continuación se ha extraído principalmente de los siguientes documentos:

- Saldarriaga, J., Siabatto, L., Cotes, L., Madrid, N., Duque, N. y Cifuentes, G. (2015). Resultados de los estudios de abastecimiento de agua para Santa Marta. Bogotá D.C.: Financiera de Desarrollo Territorial S.A. FINDETER. Proyecto “Estudio para el Fortalecimiento de la Infraestructura Sanitaria de Santa Marta para los Requerimientos Proyectados en los Próximos 50 Años”.
- FINDETER, (2015). Diagnóstico de Santa Marta. Cuaderno Santa Marta Sostenible 2016. Financiera de Desarrollo Territorial S.A. FINDETER.

El sistema de abastecimiento de la ciudad de Santa Marta es administrado por la empresa Metroagua S.A. E.S.P. desde 1989. Reporta un total de 98.600 suscriptores alcanzando una cobertura del servicio de acueducto del 89%, pero con dificultades para garantizar su continuidad por un crecimiento acelerado de la ciudad, ocasionado por población desplazada, ubicada en asentamientos subnormales, con un sistema de distribución deficiente y conectada de manera irregular. Esta situación origina unas pérdidas altas al sistema.

Los estudios de población y demanda estiman que tiene una población total de 533,225 habitantes, incluyendo población flotante en temporada alta de turismo, que demanda un caudal total de unos 1800 litros por segundo. Se estiman unas pérdidas en la red de entre 30% y 40%, según el tratamiento que se dé a las conexiones ilegales (que son agua no contabilizada, pero sí utilizada para consumo, y que por tanto satisface una demanda). Las dotaciones finales unitarias se sitúan entre 180 y 210 litros por persona y día.

Los estudios hidrológicos, hidráulicos, ambientales y antropológicos, reducen las posibilidades de abastecimiento de la ciudad captando el agua de los ríos del norte que bajan de la Sierra Nevada, por diversas razones, la principal de ellas es de tipo técnica, para abastecer la acelerada demanda de agua que el crecimiento demográfico causa a la ciudad, es necesario el aprovechamiento de varias de éstas fuentes ya que ninguna de ellas tiene por sí sola la oferta hídrica requerida.

Los efectos del cambio climático han hecho disminuir los caudales históricos en los ríos cercanos, lo que hace limitada, incierta y vulnerable la oferta de agua procedente de la Sierra Nevada.

El sistema de acueducto de la ciudad de Santa Marta se encuentra dividido en dos zonas (Norte y Sur), cada una de las cuales constituye un sistema hidráulico independiente. Esto, debido a que el territorio local se encuentra dividido naturalmente por el cerro El Ziruma, que separa a la ciudad de Santa Marta del sector turístico de El Rodadero.

La Zona Norte está constituida por la ciudad de Santa Marta y los corregimientos de Taganga y Bonda, y la Zona Sur corresponde a una zona de desarrollo turístico, conformada por El Rodadero, Gaira, Salguero, Bello Horizonte, pasando por el aeropuerto y extendiéndose hasta el límite sur del Distrito (quebrada del Doctor), en un sector denominado Los Alcatraces.

Hoy en día el sistema de acueducto de la ciudad es abastecido por tres fuentes superficiales, de las cuales dos abastecen la Zona Norte: Río Piedras y Río Manzanares, y la Zona Sur es abastecida por el Río Gaira, el cual es una de las fuentes que mantiene el caudal constante la mayor parte del año. El sistema cuenta con dos plantas de tratamiento de agua potable - la PTAP de Mamatoco la cual abastece a un 45% de la ciudad y la PTAP de El Roble.

El sistema cuenta también con un sistema de acuíferos ubicados en la ciudad Santa Marta y en el corregimiento de Gaira, cuyas fuentes de recarga principal son los ríos Manzanares, Quebrada Tamacá y Río Gaira. El agua subterránea es captada mediante una treintena de pozos profundos, que abastecen a más del 50% de la ciudad en época de verano.

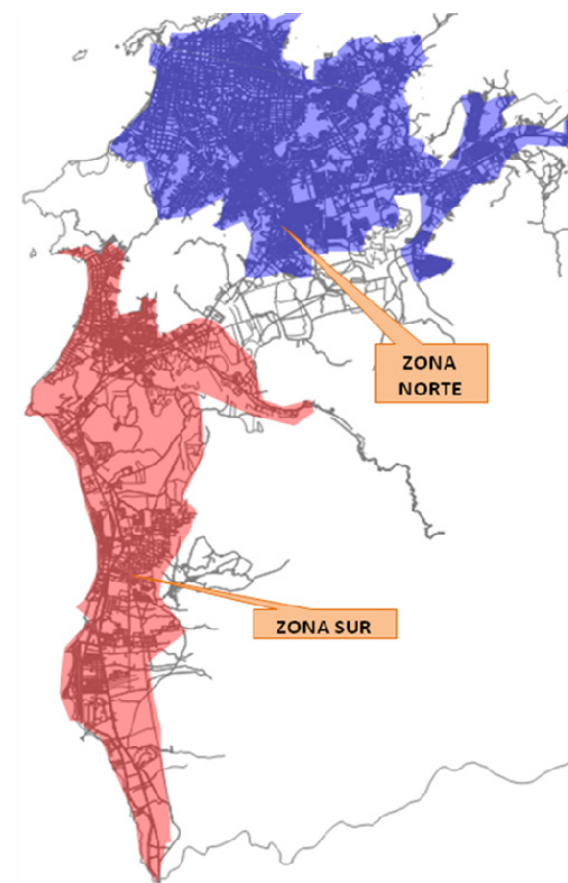


Figura 7.1. Zonas en las que se divide el sistema de acueducto de la ciudad de Santa Marta. Fuente: METROAGUA.

La cobertura de la red de distribución de agua potable aumentó considerablemente en la última década, en la que pasó de estar en un 49.5% a un 90%. Las redes cuentan con unos 890 km de tuberías con tamaños que varían entre 1 y 36".

La Zona Norte del acueducto se nutre principalmente de dos fuentes superficiales que son el Río Manzanares y el Río Piedras, mientras que la Zona Sur se nutre por medio del Río Gaira. Los Ríos Manzanares y Gaira son los ríos principales de la ciudad y la atraviesan de oriente a occidente. El mayor número de pozos en la zona norte se fundamenta en que el 70% de la población de Santa Marta se encuentra en dicha zona. La fuente de recarga principal de estos acuíferos son el Río

Las fuentes superficiales representan una buena oferta hídrica en invierno. Sin embargo, en épocas de verano se reducen mucho los caudales de los ríos y en los momentos de estiaje los pozos subterráneos pasan a ser el recurso más importante. Sin embargo, la recarga natural del acuífero no se está produciendo de forma adecuada, por motivo de las invasiones ilegales que generan un cambio en el suelo y un problema de permeabilidad.

La captación del agua en las fuentes superficiales se da por medio de estructuras construidas en una sección del río, que represan su caudal con un sistema de captación lateral. En el caso del Río Gaira en la Zona Sur la capacidad de captación hasta el año 2008 era de 300 l/s, actualmente es de 400 l/s. En el caso de los Ríos Piedras y Manzanares la captación se realiza por medio de un canal de 1 km de longitud que luego conduce el agua a un sistema de tuberías de aducción.

De acuerdo al estudio de fortalecimiento de la infraestructura sanitaria para la ciudad, se cuenta con dos plantas de tratamiento de agua potable (PTAP), la PTAP de Mamatoco y la PTAP de El Roble, las cuales producen 500 l/s y 300 l/s respectivamente para abastecer a la ciudad. Aun cuando la PTAP Mamatoco abastece el 45% de la ciudad, en el año 2014 funcionaba al 20% de su capacidad, debido al escaso caudal circulante por el río Manzanares.

Sistema de Acueducto Zona Norte

Actualmente la zona Norte es abastecida por dos fuentes superficiales: el río Piedras y el río Manzanares, cuyas corrientes proporcionan la mayor parte de abastecimiento para la ciudad de Santa Marta y transportan el agua a la Planta de Tratamiento que se encuentra ubicada dentro del perímetro urbano en el sector de Mamatoco. Estos ríos presentan una buena oferta hídrica en épocas de invierno y una muy baja en época de verano, por lo cual su caudal debe ser complementado con la extracción de agua subterránea de los acuíferos mediante pozos profundos que se encuentran estratégicamente distribuidos.

La captación en las fuentes superficiales se realiza por medio de estructuras construidas en una sección del río, que se encargan de represar parte del caudal del afluente para derivarlo hacia la aducción a través de una estructura de captación lateral.

La aducción del Río Piedras consiste inicialmente en un canal con una longitud de 1 Km, y luego pasa a la tubería de aducción puesta en funcionamiento en el año 2008 de 18.8 Km de longitud, en diámetros que varían entre los 900 y 500 mm. La aducción río Manzanares tiene una longitud total de aproximadamente 9.2 km, en diámetros que varían entre los 500 y 400 mm.

Para reforzar el sistema de acueducto en la zona Norte, se explota el sub-acuífero de Santa Marta a través de una treintena de pozos profundos ubicados en diversos puntos de la ciudad, con una profundidad promedio de 60 metros.

La Planta de Tratamiento de Mamatoco (Figura 7.2), cuenta con dos módulos con capacidad de 400 l/s cada uno, para un total de 800 l/s. El tipo de tratamiento es convencional, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.



Figura 7.2. Planta de tratamiento de Mamatoco, que recibe aguas de los ríos Manzanares y Piedras.

Desde esta Planta, se realiza tanto la distribución directa a algunos barrios, como la distribución a otros tanques y estaciones de bombeo, que a su vez se encargan de enviar el agua a más circuitos.

Sistema de Acueducto Zona Sur.

Actualmente la mayor parte de la zona Sur es abastecida por la fuente superficial río Gaira, el cual es conducido hacia la Planta de Tratamiento El Roble.

Por otra parte, el agua subterránea del sistema de acuíferos es captada mediante pozos profundos que se encuentran distribuidos en Gaira. Este sistema ayuda a mantener el suministro de esta zona en los meses de verano, donde la oferta hídrica superficial baja, y a reforzar el suministro de agua potable en las épocas de altas temporadas turísticas.

La captación en el Río Gaira se realiza por medio de una estructura que se encuentra construida en una sección del río, que se encarga de represar parte del caudal del afluente para derivarlo hacia la aducción a través de una estructura de captación lateral, con capacidad de captar hasta 300 l/s. Esta se complementa con una nueva captación construida en el año 2008 aguas abajo de la existente con capacidad de captar hasta 400 l/s. Luego el agua es conducida unos 1.7 Km hasta la Planta de Tratamiento El Roble.

Para reforzar el sistema de acueducto en la Zona Sur, se explota el acuífero de Gaira a través de varios pozos profundos ubicados en diversos puntos, con una profundidad promedio de 50 metros.

La planta de tratamiento El Roble fue recientemente ampliada y optimizada, quedando con una capacidad de tratar hasta 520 l/s. El tipo de tratamiento es convencional, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

De la Planta de Tratamiento sale una tubería de 600 mm que abastece por gravedad la zona de El Rodadero y Gaira y además alimenta el Rebombear de Gaira que es el encargado de abastecer la Zona Turística del Sur. La sectorización actual de la red de abastecimiento se puede ver en la Figura 7.3.

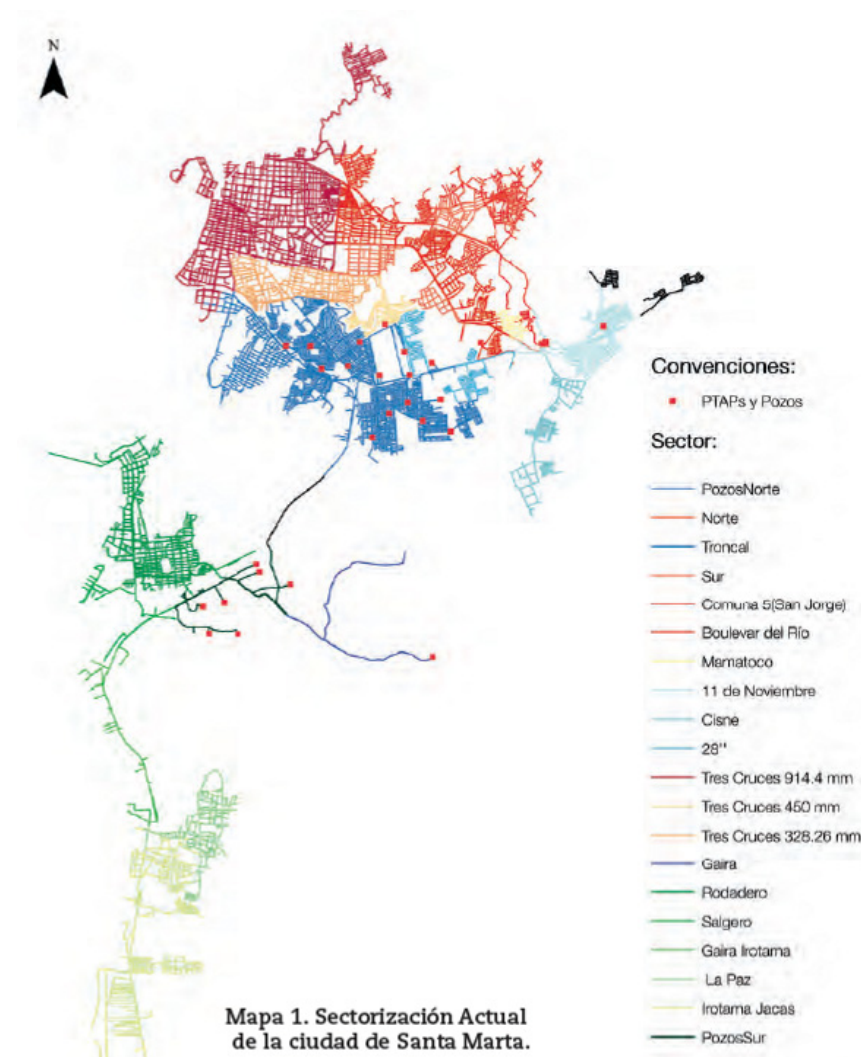


Figura 7.3. Sectorización de la red de abastecimiento de Santa Marta. Fuente: Metroagua.

7.3. Análisis de recursos disponibles y demandas hídricas

7.3.1. Estimación de caudales fluyentes en los ríos cercanos

En estos momentos se están evaluando los recursos hídricos disponibles en los ríos de las vertientes noroeste de la Sierra Nevada de Santa Marta (Figura 7.4), a partir de los datos de precipitaciones proporcionados por el IDEAN y las características de las cuencas. Tras un análisis preliminar de los datos de aforo disponibles en estos ríos, se han identificado algunas inconsistencias en los mismos, que hacen recomendable un cálculo hidrológico que se presentará en el informe final.

La Tabla 7.1 recoge unas estimaciones preliminares de caudales disponibles para la situación actual. Atendiendo a las previsiones regionales de cambio climático, se estima que para el escenario 2050 puede darse una reducción de hasta el 40% de estos valores.

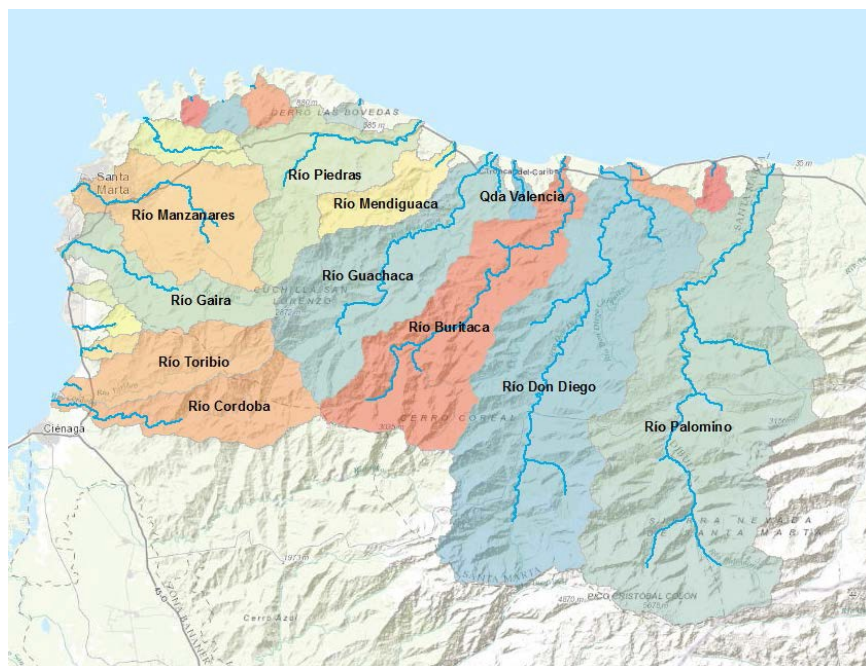


Figura 7.4. Principales cuencas en la zona de Santa Marta

Cuenca	Área (km2)	QMIN	Qecol	Qmin_disp
Río Buritaca	304.27	2.24	1.50	0.74
Río Córdoba	124.59	0.71	0.35	0.36
Río Don Diego	561.95	7.20	3.50	3.70
Río Frío	442.99	2.68	1.38	1.31
Río Gaira	111.09	0.18	0.18	0.00
Río Guachaca	267.33	2.24	1.50	0.74
Río Manzanares	185.21	0.16	0.18	-
Río Mendihiaca	61.67	0.32	0.63	-
Río Palomino	690.19	2.40	2.25	0.15
Río Piedras	159.69	0.20	0.45	-
Río Toribio	108.32	0.28	0.18	0.11
TODAS	3017.30	18.61	12.08	7.11

Tabla 7.1. Estimación de aportaciones disponibles en los ríos cercanos (Sierra Nevada)

Además, de estas cuencas menores, a unos 100 km de Santa Marta se encuentra el tramo final del río Magdalena, uno de los mayores ríos del país, y en cuya cuenca se ubica un 80% de la población. El caudal disponible procedente de esta fuente es ilimitado, a efectos del presente estudio.

7.3.2. Disponibilidad de recursos subterráneos renovables

Existe un análisis detallado del comportamiento del acuífero costero de Santa Marta, incluido en el estudio realizado en 2014 por la Universidad de los Andes. En dicho estudio se llega a la siguiente conclusión:

“Actualmente (2015) el rendimiento seguro (medio anual) del acuífero se calcula entre 250 y 400 L/s, de los cuales la recarga natural superficial en el acuífero es del orden de 30 L/s (70 mm/año) y el resto lo proveen los cauces superficiales. Si se extrae agua del acuífero únicamente en épocas de verano, dejándolo recargar en épocas de invierno, el caudal aprovechable es del orden de 500 a 600 L/s.”

Por lo tanto, a efectos de este trabajo, se adoptará como recurso subterráneo renovable la cifra de 0.5 m³/s, que sólo se empleará en las épocas de sequía, cuando los ríos no dispongan del caudal suficiente.

7.4. Escenarios de demandas y de balance hídrico.

7.4.1. Escenarios socioeconómicos de evolución de las demandas

Con el fin de cuantificar el déficit hídrico de la ciudad de Santa Marta, es necesario proyectar a futuro tanto las variables climáticas, que condicionan la disponibilidad del recurso, como las variables demográficas y socioeconómicas que determinarán la calidad del sistema de abastecimiento y la conducta de los usuarios. Para la primera proyección están disponibles los resultados procedentes del IPCC, particularizados para esta zona, así como otros estudios regionales realizados *ad hoc* (ver capítulo 3). Asimismo, la proyección demográfica forma parte de la componente 3 de desarrollo urbano de este estudio, de la que se derivan las siguientes cifras de población total en Santa Marta para la temporada alta:

Actual	2030	2050
533225	669905	930352

Las necesidades de agua también dependen de dos variables que reflejan aspectos complejos de la evolución del sistema socioeconómico, y que no son susceptibles de modelación matemática:

* Tasa de pérdidas de la red de abastecimiento. Depende fundamentalmente de la eficiencia empresa abastecedora (actualmente Metroagua), y particularmente del modelo de gestión y explotación vigente, incluyendo los incentivos que existan para la mejora continua y la reducción de costes de operación.

* Consumo final per cápita. La disposición de las personas, familias, negocios e instituciones públicas para fomentar el ahorro de agua tiene gran incidencia en las necesidades finales. Las conexiones ilegales colaboran a aumentar este consumo, no tanto por su carácter como por la irresponsabilidad y falta de control de que suelen ir acompañadas.

Para cuantificar estas variables, con un impacto significativo como ser verá en las cifras de déficit estimado, se han establecido tres posibles escenarios socioeconómicos futuros, siguiendo términos consolidados en la metodología ICES:

- **Escenario inteligente.** Desarrollo sostenible con gran reducción en pérdidas y dotación. La empresa de abastecimiento aplica herramientas y criterios de gestión de países plenamente desarrollados; se aplican tarifas progresivas y se pone en marcha un plan de gestión de fugas y de eliminación de las conexiones ilegales. Los consumidores otorgan un valor alto al agua, que se emplea en la medida estrictamente necesaria, y perciben un esfuerzo colectivo por preservarla y sacar el mayor partido de ella.
- **Escenario intermedio.** Desarrollo mixto con reducción moderada en pérdidas y dotación. La empresa de abastecimiento adopta algunas medidas, aunque sin alcanzar estándares de los países más desarrollados, para mejorar la eficiencia de la red. Los consumidores otorgan un mayor valor al agua que en la actualidad, pero sigue existiendo un amplio sector de la población que se conecta de manera ilegal y, lo que es peor, no se preocupa por el agua desperdiciada.
- **Escenario tendencial.** Desarrollo descontrolado sin reducción en pérdidas y dotaciones. Se mantienen las tendencias y parámetros registrados en la última década. La empresa de abastecimiento no tiene incentivos para mejorar la gestión y la población no reduce el consumo de agua, pese a que la calidad y garantía de suministro se deterioran progresivamente.

Las cifras de dotación neta y pérdidas totales en la red (incluyendo pérdidas en la aducción, tratamiento, red en baja y conexiones domiciliarias) que caracterizan los tres escenarios definidos son las siguientes:

Dotaciones (l/p-d)	Actual	2030	2050
Esc. Inteligente	200	150	120
Esc. Intermedio	200	180	160
Esc. Tendencial	200	200	200

Pérdidas totales (%)	Actual	2030	2050
Esc. Inteligente	35%	20%	15%
Esc. Intermedio	35%	25%	20%
Esc. Tendencial	35%	35%	35%

Nótese que el escenario inteligente no se corresponde con un escenario óptimo idealizado sino realista, aunque propio de ciudades con nivel de desarrollo alto; en ningún caso se han establecido valores que no hayan sido alcanzados, y muchas veces superados, en ciudades de características similares. De la misma forma, el escenario tendencial tampoco representa la peor de las evoluciones posibles, ya que los valores de 200 l/p-d y 30% de pérdidas bien podrían deteriorarse, en lugar de mantenerse estables. En cualquier caso, se considera que estos tres escenarios representan bandas de confianza representativas de la mayor parte de las evoluciones probables del sistema.

7.4.2. Necesidades de recursos superficiales en los escenarios considerados

A partir de los elementos descritos previamente, este apartado se centra en evaluar cuál es la máxima necesidad de recursos hídricos superficiales en los tres escenarios de evolución socioeconómica definidos, para un periodo de sequía, en los tres instantes de tiempo considerados. Los resultados se muestran en las tablas siguientes:

ESC. TENDENCIAL	Sit. actual	H2030	H2050
Población total	533225	669905	930352
Dotación neta (l/p-d)	200	200	200
Pérdidas totales (%)	35%	35%	35%
Consumo medio (m3/d)	164069	206125	286262
Consumo medio (m3/s)	1.90	2.39	3.31
Aporte de pozos (m3/s)	0.50	0.50	0.50

ESC. TENDENCIAL	Sit. actual	H2030	H2050
Consumo superficial (m3/s)	1.40	1.89	2.81
Consumo superficial (m3/día)	120869	162925	243062
Diámetro necesario (m) con v=1 m/s	1.33	1.55	1.89

ESC. INTERMEDIO	Sit. actual	H2030	H2050
Población total	533225	669905	930352
Dotación neta (l/p-d)	200	180	160
Pérdidas totales (%)	35%	25%	20%
Consumo medio (m3/d)	164069	160777	186070
Consumo medio (m3/s)	1.90	1.86	2.15
Aporte de pozos (m3/s)	0.50	0.50	0.50
Consumo superficial (m3/s)	1.40	1.36	1.65
Consumo superficial (m3/día)	120869	117577	142870
Diámetro necesario (m) con v=1 m/s	1.33	1.32	1.45

ESC. INTELIGENTE	Sit. actual	H2030	H2050
Población total	533225	669905	930352
Dotación neta (l/p-d)	200	150	120
Pérdidas totales (%)	35%	20%	15%
Consumo medio (m3/d)	164069	125607	131344
Consumo medio (m3/s)	1.90	1.45	1.52
Aporte de pozos (m3/s)	0.50	0.50	0.50
Consumo superficial (m3/s)	1.40	0.95	1.02
Consumo superficial (m3/día)	120869	82407	88144
Diámetro necesario (m) con v=1 m/s	1.33	1.10	1.14

En definitiva, para el horizonte 2050 Santa Marta, en periodo de sequía, requerirá recursos procedentes de fuentes que no sean sus propios pozos por valor de entre 88,144 y 243,062 m³/día (1.02 y 2.81 m³/s), según las medidas aplicadas en relación con la eficiencia de la red y los consumos por persona. Como se verá más adelante, estas cifras representan, a efectos prácticos, el déficit hídrico estructural de la ciudad, ya que en condiciones de sequía los ríos Manzanares y Gaira no aporta apenas caudal, y menos aún si se respetan unos flujos mínimos para mantenimiento del ecosistema. Como se puede observar, existen diferencias apreciables entre los tres escenarios considerados, lo que en última instancia se traducirá en fuertes divergencias en el coste y tipología de las actuaciones disponibles para resolver el problema de abastecimiento en Santa Marta.

7.5. Diagnóstico y análisis de alternativas de actuación.

7.5.1. Balance hídrico por escenarios y definición de alternativas

Existen tres problemas fundamentales en el sistema de suministro de agua potable en el Distrito de Santa Marta, que de forma conjunta inciden en el grave desabastecimiento de la ciudad en periodos de sequía:

- 1- Baja disponibilidad de recursos hídricos
- 2- Baja eficiencia del sistema de abastecimiento urbano
- 3- Altos consumos y escasa cultura del agua en los consumidores

Este estudio se centrará en evaluar las alternativas disponibles para resolver el primero de los problemas, considerando diferentes grados de resolución de los otros dos, caracterizados por los tres escenarios descritos en el apartado anterior.

A la vista de la información disponible y de las predicciones locales de cambio climático, que apuntan hacia reducciones muy severas en las precipitaciones, el único río del sistema de la Sierra Nevada que presenta un excedente de recursos hídricos en su desembocadura para el horizonte 2050, respetando un caudal de mantenimiento, es el río Don Diego. En particular, se ha estimado que su caudal mínimo disponible en un periodo muy seco correspondiente a dicho horizonte en el río Don Diego asciende a 1.85 m³/s (nótese la reducción que supone esta cifra con respecto al caudal que se ha medido in situ en febrero de 2016, considerado un instante crítico, que fue de 9 m³/s). Por encima de

este valor, se requeriría traer el agua del río Magdalena, o bien recurrir a procedimientos no convencionales como la desalación o la reutilización de aguas residuales. Las alternativas disponibles en función del escenario considerado para la evolución de las pérdidas en la red y las dotaciones se resumen a continuación:

ESCENARIO	DÉFICIT HÍDRICO DE DISEÑO	ALTERNATIVAS
Tendencial	2.81 m ³ /s 243,062 m ³ /día	- Traspase del río Magdalena (MAG) - Desalación (DES) - Reutilización de aguas residuales (REU)
Intermedio	1.65 m ³ /s 142,870 m ³ /día	- Traspase del río Magdalena - Traspase del río Don Diego (DIE) - Desalación - Reutilización de aguas residuales
Inteligente	1.02 m ³ /s 88,144 m ³ /día	- Traspase del río Magdalena - Traspase del río Don Diego - Desalación - Reutilización de aguas residuales

Las dos alternativas de trasvase disponibles, bien desde el Magdalena o desde el río Don Diego, aunque son técnicamente viables, presentan desventajas que, como se verá en un apartado posterior, inciden notablemente en el coste medio final del agua obtenida. En el caso del Magdalena, la longitud del trasvase es grande (en torno a 100 km) y se debe atravesar la isla de Salamanca, una zona protegida, expuesta a altas tasas de erosión costera y que, con las subidas del mar previstas para el horizonte 2050 (ver capítulo 8), bien podría desaparecer en algunos tramos, si no se toman medidas estructurales (que en todo caso incrementarían aún más el coste de las obras). En el caso del río Don Diego, el terreno es más franco y su longitud es la mitad, pero se debe ascender a una cota topográfica de unos 400 m, lo que supone elevados gastos de bombeo.

Por estas razones, y dado la naturaleza costera o estuarina tanto de los puntos potenciales de aportación (Magdalena y Don Diego) como del punto de entrega del agua (Santa Marta), se ha considerado interesante llevar a cabo un análisis básico de la viabilidad técnica y económica de realizar los citados trasvases empleado un buque

tanquero, en lugar de una tubería convencional con varios bombeos. Se trata de una solución discontinua cuyas principales diferencias con las soluciones de tubo son:

- ✓ Reducida huella en el territorio. Únicamente se requieren las instalaciones de toma, carga y descarga, que varios puntos estarían ya disponibles. Esto también reduce el impacto ambiental de las obras y la posible afectación a futuras infraestructuras.
- ✓ Bajas necesidades de inversiones iniciales en inmovilizado. Las grandes obras hidráulicas en general requieren un endeudamiento del ente responsable, que en el caso de Santa Marta probablemente llevaría asociada un tipo de interés elevado. La solución mediante buques permitiría variabilizar una buena parte de los costes.
- ✓ Escalabilidad, flexibilidad y reversibilidad. Se trata de una solución que es fácilmente escalable a diferentes necesidades hídricas, en función de la evolución real del sistema, con toda la incertidumbre que lleva asociada; se puede adaptar incluso a las necesidades estacionales, reduciendo la infrautilización de los equipos. En caso de que no resulte satisfactoria, se podría revertir la decisión y optar por otra alternativa, con costes hundidos asumibles.

En definitiva, las alternativas que se consideran viables y que se analizarán con mayor detalle en el próximo apartado son:

- 1) Trasvase mediante tubería desde el río Magdalena (MAG)
- 2) Trasvase mediante tubería desde el río Don Diego (DIE)
- 3) Transporte por barco de agua desde el río Magdalena o Don Diego (BAR)
- 4) Planta desaladora en Santa Marta (DES)

7.5.2. Descripción de alternativas

TRASVASE POR TUBERÍA DESDE EL RÍO DON DIEGO (DIE).

[EN DESARROLLO]

TRASVASE POR TUBERÍA DESDE EL RÍO MAGDALENA (MAG).

[EN DESARROLLO]

TRANSPORTE MARÍTIMO DE AGUA PARA ABASTECIMIENTO URBANO (BAR)

La construcción de una tubería desde los puntos con excedente hídrico cercanos hasta Santa Marta, que constituye la solución convencional para la mayoría de los casos, plantea aquí varias dificultades que se traducen en riesgos significativos de ejecución y explotación:

- Trasvase norte: la tubería debe superar una cota topográfica máxima de 400 m. El terreno es escarpado y en ciertos puntos pueden requerirse obras de desmonte y excavación en roca, piezas de anclaje singulares, tubería reforzada, válvulas especiales, sistemas anti-ariete y de rotura de carga, etc.
- Trasvase Magdalena: además de su gran longitud, la tubería discurre por una zona geomorfológicamente compleja, atravesando la Isla de Salamanca (parque natural) donde se encontrará expuesta a riesgos naturales severos: erosión costera, aumento del nivel del mar, corrosión e intrusión salina, entre otros. Dado que se requeriría una zanja 8-10 m de anchura (equivalente a una carretera de 2 carriles con mediana y arcenes) y de 3-4 de profundidad, habría varios tramos (entre ellos el ya estudiado km 19 de la carretera Barranquilla-Santa Marta) donde se requerirían rellenos (caros e inestables) o bien tubería aérea (en voladizo), lo que incrementaría notablemente los costes de ejecución



Figura 7.5. Ejemplo de barco tanquero de 50,000 toneladas

Ante estas circunstancias, se van a evaluar dos alternativas no convencionales para el transporte de agua de abastecimiento urbano a la ciudad de Santa Marta:

- Transporte marítimo desde los posibles puntos de entrega (desembocadura del río Don Diego, en el Norte, y río Magdalena) hasta el puerto de Santa Marta.
- Construcción de una planta desaladora en Santa Marta.

La solución de transporte marítimo consiste en llevar agua tratada desde los puntos donde existe disponibilidad, río Don Diego o río Magdalena, hasta el puerto de Santa Marta. Se da la circunstancia de que la ubicación del puerto, y la existencia de puntos elevados cercanos donde ubicar depósitos de abastecimiento, son favorables para articular una remodelación del sistema de abastecimiento urbano, incorporando fuentes suplementarias de agua para toda la ciudad desde dicho sector. Además, el uso del puerto para estos fines ayudaría a mejorar la percepción social del puerto y la integración puerto-ciudad a nivel simbólico y funcional. Además, la conexión de Taganga al sistema de abastecimiento sería relativamente simple, mediante una impulsión y caída por gravedad desde el nuevo punto de suministro.

Se trata de una alternativa de funcionamiento discontinuo, que es equivalente a una instalación convencional de tubería y bombeo, aportando flexibilidad en lo que se refiere a los puntos de carga y descarga. Con esta solución, es posible convertir en variables una parte importante de los costes de abastecimiento en Santa Marta, ya que las inversiones en infraestructuras se reducen notablemente. No obstante, también se requieren las siguientes instalaciones fijas:

- En el caso de que el punto de suministro sea el río Don Diego, se requieren los siguientes elementos: captación de agua en el cauce, bombeo, ETAP, depósito, tubería de conexión y terminal de carga del buque tanquero (pantalán y duque de alba, por ejemplo).
- En el caso de que el punto de suministro sea el río Magdalena, podrían construirse los mismos elementos antes citados, o bien adquirir el agua tratada de la empresa abastecedora de Barranquilla, y cargarla en una terminal disponible de dicho puerto. En ese último caso, sólo se requeriría un depósito y una tubería con impulsión desde la ETAP hasta el punto de carga, ahorrándose la construcción de la captación, tubería de transporte y la planta de tratamiento (o, mejor dicho, variabilizando sus costes)
- En el punto de entrega: punto de atraque (en el caso de Santa Marta podría habilitarse una terminal en el propio puerto), tubería de conexión y depósito de entrega.

Cabe apuntar que parte de estas instalaciones no son diferenciales de este tipo de soluciones, ya que se requieren igualmente para las convencionales basadas en tuberías. Los costes diferenciales de las alternativas basadas en transporte marítimo son principalmente las terminales marítimas (creación o adecuación de las existentes) para carga y descarga de los buques. Además, mientras que los depósitos de almacenamiento son opcionales en las alternativas con tubería (sirven para aumentar la garantía de abastecimiento y para abaratar los costes energéticos, si se realizan los bombeos en periodos de tarifa valle), en el caso del transporte marítimo son imprescindibles ya que, de no existir, los tiempos de carga de los buques estarían limitados por el caudal de tratamiento de la ETAP, y serían muy altos (por ejemplo, una planta de 500 l/s de capacidad tarda aproximadamente 24 horas en tratar 50 000 m³). En definitiva, un depósito de 50,000-100,000 m³ de capacidad permite ecualizar la producción de una

planta potabilizadora, que funcionaría en continuo durante todo el día (tasa de producción de 0.5-1 m³/s), con el llenado de un barco, que se debería realizar en 1.5-3 horas, a un ritmo de 5-10 m³/s. El ciclo de transporte para un volumen de 50,000 m³ tendría una duración media de 10-12 horas (según el punto de suministro), de acuerdo con las siguientes fases:

- Carga en el punto de suministro: 3 horas
- Transporte hasta Santa Marta. Unas 2 horas desde Don Diego y 3 horas desde Barranquilla, asumiendo una velocidad media de 20 nudos.
- Descarga en el punto de entrega: 3 horas
- Vuelta al punto de carga: 2-3 horas.

Los tiempos de carga y descarga son susceptibles de acortarse a la mitad, a un coste moderado, lo que permitiría reducir el ciclo completo a 7-9 horas (50,000 m³) o mover 100,000 m³ cada 10-12 horas. Dado que en varios escenarios sería factible realizar dos ciclos al día, una solución de este tipo podría también servir como fuente de abastecimiento complementaria a otras ciudades con escasez hídrica como Ríohacha y Manaure en la Guajira, lo que permitiría optimizar el uso de los recursos y alcanzar precios unitario finales más bajos.

Los costes de esta solución son difíciles de estimar con precisión, ya que se trata de una alternativa poco convencional. Sin embargo, este hecho no implica, como podría pensarse de forma intuitiva, que la solución tenga alto riesgo tecnológico, sino más bien al contrario. Los equipos e instalaciones dedicadas a la logística de transporte de líquidos (generalmente petróleo, aceite o GNL) tienen un nivel de desarrollo y una fiabilidad muy altas, claramente superiores a los de la industria del abastecimiento de agua, como corresponde al mayor valor de la mercancía y riesgo de daños por vertidos.

Los costes medios de operación (incluyendo personal, mantenimiento, administración y seguros) para barcos tanqueros de 50000-100000 DWT, se sitúan en torno a 8000 USD/día (Ship operating costs: Current and future trends. Richard Greiner, Moore Stephens LLP. December 2014). Se estima que el coste total de transporte de agua en Santa Marta incluyendo los gastos de operación y de amortización del buque podrían situarse entre 12000 y 16000 USD/día; el precio aproximado de un barco tanquero de

unas 50,000-100,000 toneladas de capacidad se sitúa en torno a 40-60 MUSD. En el caso de que finalmente se adoptara este tipo de alternativa para el suministro de agua en alta de la ciudad, se trata de un servicio con unas condiciones favorables para ser externalizado bajo una concesión otorgada mediante concurso a una empresa de transporte marítimo. La empresa adjudicataria asumiría unos compromisos, con penalizaciones asociadas, en cuanto a parámetros de servicio, y el ente contratante garantizaría unas condiciones mínimas de funcionamiento (volumen de facturación, precio mínimo, etc.).

En la siguiente tabla se presentan los costes unitarios resultantes, en función del volumen total trasegado en millones de USD:

	ESC. TENDENCIAL	ESC. INTERMEDIO	ESC. INTELIGENTE
BUQUE TANQUERO	100	70	50
TERMINAL DE CARGA	12	9	8
TERMINAL DE DESCARGA	6	4	3
DEPÓSITO CONSUMO 24 H.	5	3	2.4
TOTAL:	123	86	63.4

Estas cifras se presentan únicamente a título orientativo, y llevan asociada un mayor grado de incertidumbre que las presentadas para el resto de alternativas, por tratarse de actuaciones singulares y no existir estudios previos. En el caso de que se desee evaluar con más detalle la viabilidad de esta solución, se requerirían estudios complementarios que incluirían al menos:

- Análisis, dimensionamiento básico y valoración económica de las instalaciones y equipamientos necesarios en tierra, incluyendo la construcción de nuevas infraestructuras y la adecuación de las existentes.
- Prospección de disponibilidad y costes del servicio de transporte por mar de agua tratada, basándose en consultas directas a representantes de la industria.
- Análisis de las condiciones jurídicas y administrativas asociadas al nuevo modelo de abastecimiento: titularidad de las instalaciones nuevas, modelo de colaboración con los puertos y entes implicados, cláusulas del contrato tipo de concesión del transporte de agua, etc.

Planta desaladora (DES)

Partiendo de cifras medias de proyectos realizados durante los últimos años en todo el mundo, el coste estimado de construcción de una planta desaladora con capacidad de 130,000 m³/d (1.5 m³/s) en Santa Marta sería de unos 220 MUSD. Sumando los costes de explotación y mantenimiento, asumiendo una eficiencia energética de 3 kwh/m³ (incluyendo el servicio del agua a cota +100 m), resultan unos costes variables del orden de 0.6-0.7 USD/m³. Los datos proceden principalmente del documento Seawater Desalination Costs. White Paper. Watereuse Association. January 2012

Si bien la inversión inicial sólo es algo superior a la que requieren los trasvases propuestos, los costes variables son entre 2 y 4 veces más altos, lo que hace que esta solución resulte menos favorable en términos económicos.

7.5.3. Análisis coste-beneficio y comparación de alternativas

Se ha realizado un análisis coste-beneficio de las alternativas disponibles para cada escenario, basado en la información disponible. Únicamente se han considerado los costes y beneficios diferenciales, dejando fuera del cálculo los costes comunes a todas las alternativas, ya que no sirven para discriminar entre ellas. Entre estos costes comunes se encuentran:

- Captación en el punto de toma y bombeo a la planta de tratamiento
- Planta potabilizadora
- Bombeo y depósito de entrega de la planta potabilizadora.

Se ha considerado una vida útil para todas las alternativas de 50 años, igual al periodo de cálculo; por tanto, las inversiones no tienen valor residual al final de dicho periodo. Los resultados obtenidos del coste actualizado neto para los tres escenarios analizados se presentan a continuación.

ESC. TENDENCIAL	MAG	BAR	DES
Caudal diario (m ³ /d)	243062	243062	243062
Long. Tubería (km)	95	5	5
Coste medio tuberías (MUSD/km)	1.3	1.3	1.3
Otras inversiones	0	123	200
Gasto de capital (MUSD)	123.5	129.5	206.5
Pérdidas medias tubería (mm/m)	1.5	1	1
Altura topográfica (m)	100	100	0
Coste medio energía (USD/Kwh)	0.15	0.15	0.12
Altura hidráulica (m)	142.5	5	0
Altura total (m)	242.5	105	0
Rendimiento energético (kwh/m ³)	0.78	0.34	3.00
Coste energético (MUSD/año)	10.35	4.48	31.94
Coste explot. (MUSD/año)	1.24	2.20	15.97
Gasto de operación (MUSD/año)	11.58	6.68	47.91
Tasa descuento (%)	8%	8%	8%
VAN (MUSD) costes	-245.53	-195.60	-733.87

ESC. INTERMEDIO	MAG	DIE	BAR	DES
Caudal diario (m ³ /d)	142870	142870	142870	142870
Long. Tubería (km)	95	50	5	5
Coste medio tuberías (MUSD/km)	1.2	1.1	1.2	1.2
Otras inversiones	0	0	86	145
Gasto de capital (MUSD)	114	55	92	151
Pérdidas medias tubería (mm/m)	1.5	1.5	1	1
Altura topográfica (m)	100	400	100	0
Coste medio energía (USD/Kwh)	0.15	0.15	0.15	0.12
Altura hidráulica (m)	142.5	52.5	5	0
Altura total (m)	242.5	452.5	105	0
Rendimiento energético (kwh/m ³)	0.78	1.45	0.34	3.00

ESC. INTERMEDIO	MAG	DIE	BAR	DES
Coste energético (MUSD/año)	6.08	11.35	2.63	18.77
Coste explot. (MUSD/año)	1.14	0.55	2.20	9.39
Gasto de operación (MUSD/año)	7.22	11.90	4.84	28.16
Tasa descuento (%)	8%	8%	8%	8%
VAN (MUSD) costes	-187.35	-185.69	-139.95	-458.79

ESC. INTELIGENTE	MAG	DIE	BAR	DES
Caudal diario (m3/d)	88144	88144	88144	88144
Long. Tubería (km)	95	50	5	0
Coste medio tuberías (MUSD/km)	1.1	1	1.1	1.1
Otras inversiones	0	0	63.4	95
Gasto de capital (MUSD)	104.5	50	68.9	95
Pérdidas medias tubería (mm/m)	1.5	1.5	1	1
Altura topográfica (m)	100	400	100	0
Coste medio energía (USD/Kwh)	0.15	0.15	0.15	0.12
Altura hidráulica (m)	142.5	52.5	5	0
Altura total (m)	242.5	452.5	105	0
Rendimiento energético (kwh/m3)	0.78	1.45	0.34	3.00
Coste energético (MUSD/año)	3.75	7.00	1.62	11.58
Coste explot. (MUSD/año)	1.05	0.50	2.20	5.79
Gasto de operación (MUSD/año)	4.80	7.50	3.83	17.37
Tasa descuento (%)	8%	8%	8%	8%
VAN (MUSD) costes	-151.09	-131.26	-107.13	-284.75

Existen también aspectos o características de las diferentes alternativas que, si bien no tienen incidencia en el análisis coste-beneficio por no ser fácilmente monetarizables, deben ser tenidas en cuenta a la hora de tomar una decisión, o como elementos de un estudio de mayor detalle:

- Calidad del agua de cada una de las alternativas y costes de tratamiento asociados

- Riesgos de ejecución (desvío de presupuestos y plazos) y de operación
- Factores político-administrativos: jurisdicción de las instalaciones y servidumbres de paso
- Escalabilidad y flexibilidad operativa de las distintas soluciones.
- Impacto ambiental y a las comunidades indígenas.

Estos resultados se encuentran en proceso de revisión y validación en estos momentos, por lo que se presentan con carácter preliminar. Las principales conclusiones que se derivan de los mismos, también sujetas a esta provisionalidad, son las siguientes:

- La solución óptima, y su coste asociado, depende en gran medida de la evolución de los consumos brutos de agua (pérdidas y dotaciones) en Santa Marta. Se recomienda poner énfasis en la reducción de ambas variables (pérdidas y dotaciones), en la misma medida que se actúa para resolver la escasez del recurso.
- El escenario tendencial conlleva costes muy altos para satisfacer la demanda de toda la población futura. La opción menos cara a priori es traer el agua desde el río Magdalena (el río Don Diego no garantiza el caudal requerido), pero no mediante una tubería continua, sino mediante un barco tanquero que realizara uno o dos viajes por día (dependiendo de las condiciones de déficit).
- En el escenario intermedio, la mejor opción sigue siendo el transporte por barco, mientras que las alternativas de trasvase convencional desde el río Magdalena y desde el río Don Diego resultan económicamente similares.
- En el escenario inteligente, la mejor solución es el transporte marítimo, seguida de cerca por un trasvase por tubería desde el río Don Diego, que para este volumen resulta más económico que una tubería desde el Magdalena
- La desalación es una opción más cara que el resto en todos los escenarios, y en todo caso sólo se podría considerar en el contexto de un escenario inteligente.
- La solución basada en transporte por barco, bien desde el Magdalena o desde Don Diego, resulta a priori interesante pero requiere estudios de factibilidad más detallados, dada su singularidad.

8. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR EROSIÓN COSTERA

8.1. Introducción

El tercero de los riesgos seleccionados para este estudio es el de erosión costera. La ciudad de Santa Marta se sitúa a orillas de la bahía que lleva su mismo nombre en las estribaciones de la Sierra Nevada en el departamento del Magdalena, por lo que la erosión en el entorno metropolitano constituye una de las amenazas que afecta de forma más directa al futuro desarrollo de la ciudad. Las playas del área de estudio están expuestas a numerosos factores que producen oscilaciones en la posición de la línea de costas: la propia variabilidad de la dinámica marina, los aportes fluviales y al ascenso del nivel medio del mar inducido por el calentamiento global.

En conjunto se trata de una costa conformada por bahías amplias protegidas por puntas rocosas duras, en donde las playas abrigadas se encuentran altamente intervenidas por acciones antrópicas. El crecimiento demográfico y la densificación urbanística han dado lugar al desarrollo en plena línea de costa, sin dejar en ocasiones ningún retiro en el litoral, lo cual expone las viviendas y edificaciones frente a la acción del mar, incrementándose la vulnerabilidad de las mismas. Además, en las últimas décadas se han construido tanto obras costeras que interrumpen la deriva natural del sedimento, como obras en los cauces que desembocan sus aguas en las playas de la ciudad. Es importante señalar en este sentido que el transporte de material sólido de un río se produce, fundamentalmente, bajo situaciones de avenida, por lo cual, al modificar el lecho o los contornos de los ríos, se altera el aporte sedimentario a las playas de la ciudad.

En el caso de la ciudad de Santa Marta, la zona costera es de vital importancia como atractivo turístico, residencial y comercial; por lo cual, el enfoque del presente estudio se centra en la evaluación del riesgo de erosión costera en las playas más concurridas por locales y visitantes; siendo éstas, las playas de bahía de Santa Marta, Playas El Rodadero y Playa Salguero.

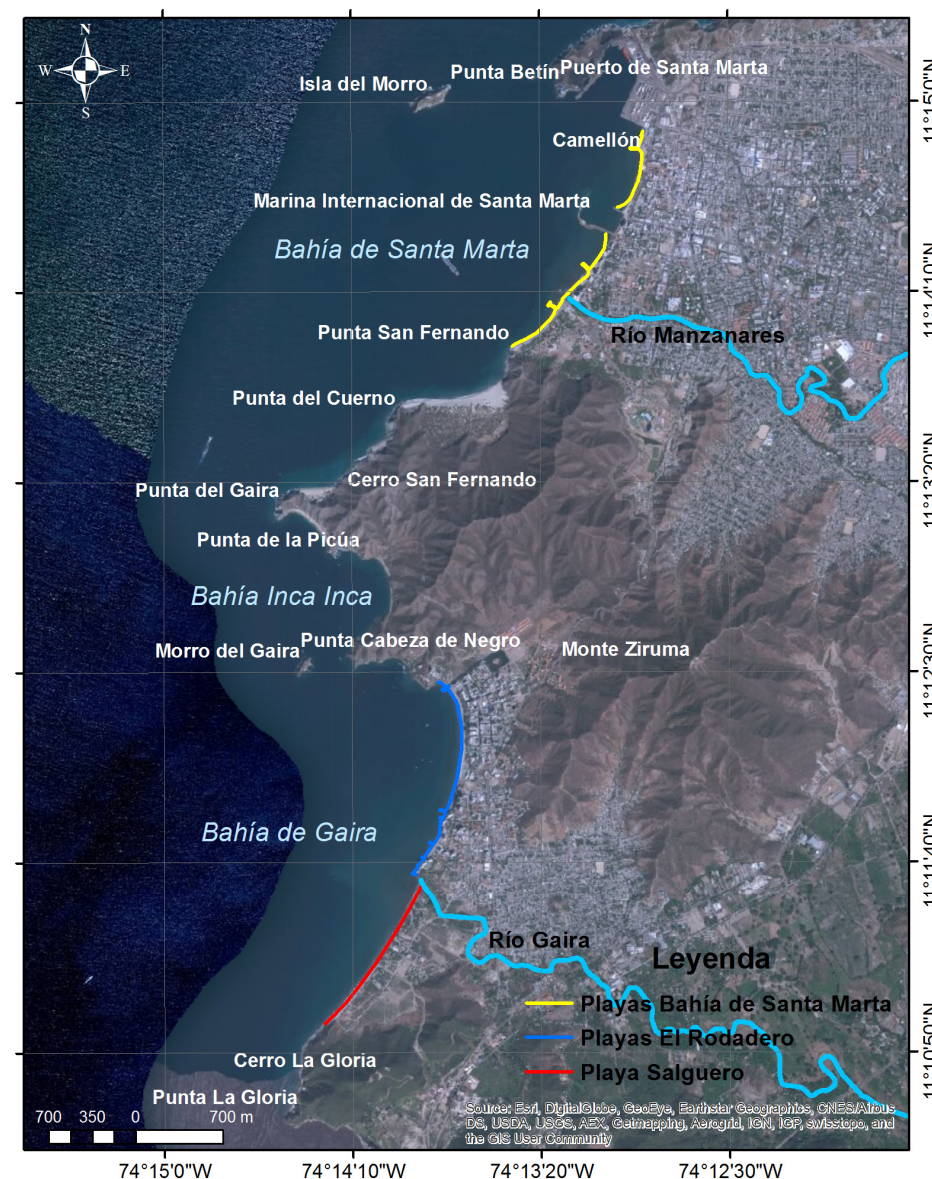


Figura 8.1. Playas objeto de estudio en Santa Marta

Tal como se observa en la Figura 8.1, las playas de la bahía de Santa Marta están acotadas entre Punta Betín y Punta San Fernando, abarcando una longitud cercana a 2.2 km. De sur a norte, las playas de dicha bahía son las siguientes:

- Playa San Fernando acotada entre la desembocadura del río Manzanares y Punta San Fernando.
- Playa Los Cocos acotada entre la desembocadura del río Manzanares y la Marina Internacional de Santa Marta.
- Playa del Centro entre la Marina Internacional y el dique ubicado al extremo norte, donde comienza la zona portuaria.

Las Playas El Rodadero se extienden aproximadamente 1.65 km desde el extremo norte acantilado hasta la desembocadura del río Gaira; mientras que la Playa Salguero continua 1.5 km de arenal desde el Gaira hasta el Cerro La Gloria. En la siguiente figura 8. se presentan imágenes aéreas de las playas objeto de estudio.



Figura 8.2. Imágenes aéreas. a) Playas bahía de Santa Marta, b) Playas El Rodadero y c) Playa Salguero

8.2. Metodología

Con el fin de evaluar la amenaza de erosión costera en las playas de la ciudad de Santa Marta, se propone hacer en principio un análisis histórico tanto de evolución de las costas por acción humana, como historia física de eventos naturales que han actuado sobre el litoral samario.

A continuación se analizarán los procesos de régimen de oleaje, huracanes y avenidas de ríos, para caracterizar el impacto que genera cada uno de ellos en la costa. Finalmente se presenta un diagnóstico del modelo de funcionamiento de cada una de las playas en la situación actual.

8.3. Antecedentes históricos

En el presente apartado se realiza un análisis histórico tanto de la evolución de las costas por acción humana, como historia física de eventos naturales que han actuado sobre el litoral samario.

8.3.1. Historia antrópica

La situación actual de erosión en las playas del municipio de Santa Marta, responde en gran medida a las actuaciones humanas desarrolladas a lo largo de la historia de la ciudad. Cabe resaltar que las tres zonas costeras han sufrido una gran presión urbanística en los últimos años.

En el caso de las playas de la bahía de Santa Marta, éstas han sido las más intervenidas por obras como la Marina Internacional de Santa Marta, espolones o diques, y actuaciones de regeneraciones de playa.

En la Figura 8.3 se presenta un resumen histórico de las fechas en las que se han construido obras costeras a lo largo de la bahía de Santa Marta, teniendo como referencia el año 2006 a partir del cual se tienen imágenes satelitales de Google Earth, y es el punto de partida del análisis de evolución de línea de costa que se presenta más adelante en el informe.



Figura 8.3. Resumen cronológico de obras costeras en bahía de Santa Marta

Al igual que en el caso anterior, en la Figura 8.4 se ilustra un resumen cronológico de las obras construidas en Playas El Rodadero, de las cuales se tiene registro. Se observa cómo las obras del canal de La escollera han permitido la estabilidad de una pequeña playa en el extremo norte (recuadro azul), y en el extremo sur se tiene otra playa encajada, conocida como Playa Colón (recuadro rojo), en donde se han construido diques en los extremos y uno central.

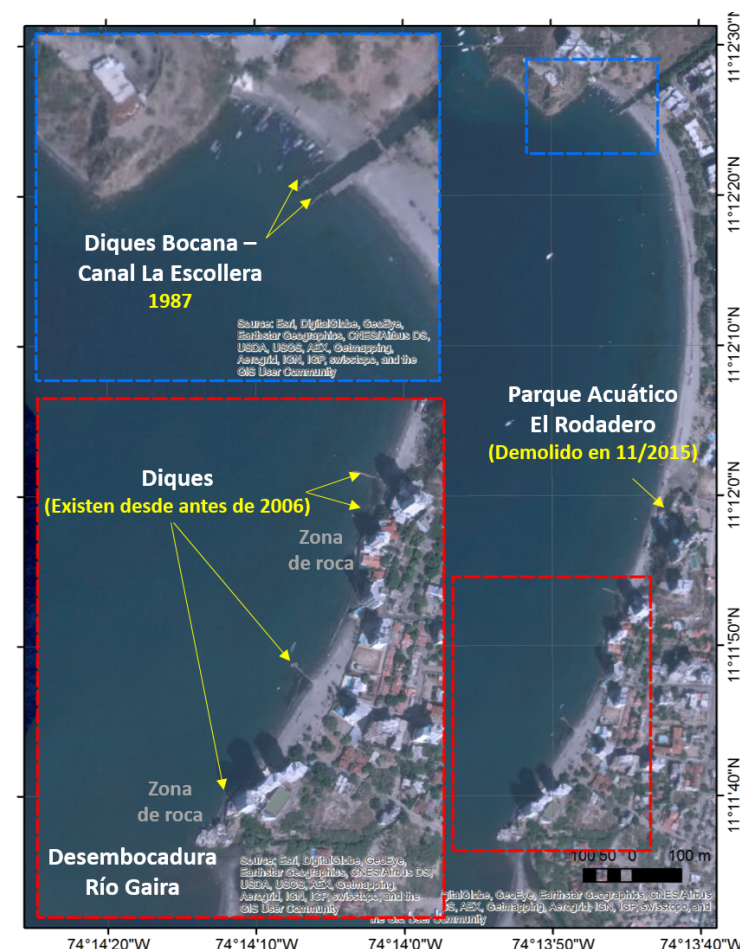


Figura 8.4. Resumen cronológico de obras costeras en Playas El Rodadero

Finalmente, en Playa Salguero no se tiene registro hasta la fecha de obras construidas en plena línea de costa.

8.3.2. Evolución histórica de la playa

El cálculo del transporte sólido longitudinal en la costa, puede ser obtenido a partir de diversos medios, tales como: (1) medición del transporte de sedimento en campo; (2) evidencias morfológicas de la costa; (3) evolución de la línea de costa; y (4) cálculo teórico. De acuerdo al alcance del presente estudio, se propone en esta sección el cálculo del transporte sólido litoral a partir de la evolución de la línea de costa, la cual se puede obtener a partir de la restitución de imágenes aéreas. La ventaja de este método es que permite obtener información valiosa de épocas históricas de las cuales no se cuenta con batimetrías ni mediciones, por supuesto, se encuentra sujeta a suponer un perfil de playa que avanza o retrocede con la línea de costa.

Para obtener una evolución histórica de la posición de línea de costa, se ha recurrido a imágenes satelitales de Google Earth disponibles, seleccionando las capturas de mejor resolución o calidad visual para los años 2006, 2012, 2013, 2014 y 2015. Para el año 2009 se ha utilizado la ortofoto disponible por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) que corresponde al sobrevuelo del día 30 de enero de 2009, en una escala de 1:2000. En el caso de las imágenes de Google Earth ha sido necesario la georreferenciación de las imágenes, para posteriormente digitalizar la línea de costa.

Teniendo las líneas de costa digitalizadas se plantean dos tipos de análisis de la erosión en las playas: el primero corresponde al estudio por unidad de playa calculando la variación del ancho medio, con lo cual se puede conocer la pérdida o ganancia de volumen sedimentario en cada unidad; y por otro lado, un segundo análisis correspondiente a la variación de la posición de la costa sobre distintos cortes en las playas, para así obtener el avance/retroceso en cada uno de ellos, permitiendo diferenciar la variabilidad espacial del sedimento, localizándose las zonas de erosión o acumulación.

• PLAYAS BAHÍA DE SANTA MARTA

En la Figura 8.5 se presenta la evolución de posiciones de líneas de costa en las playas de bahía de Santa Marta, con la respectiva evolución del ancho medio de cada uno de los tramos seleccionados, medido a partir de una línea de referencia (línea negra). En este caso se resalta el Tramo 2 en donde se tiene una pérdida de sedimento por disminución de aporte del río Manzanares en los últimos años, alcanzando un retroceso cercano a 20 m; mientras en el Tramo 3 se observa un avance del mismo orden de magnitud.

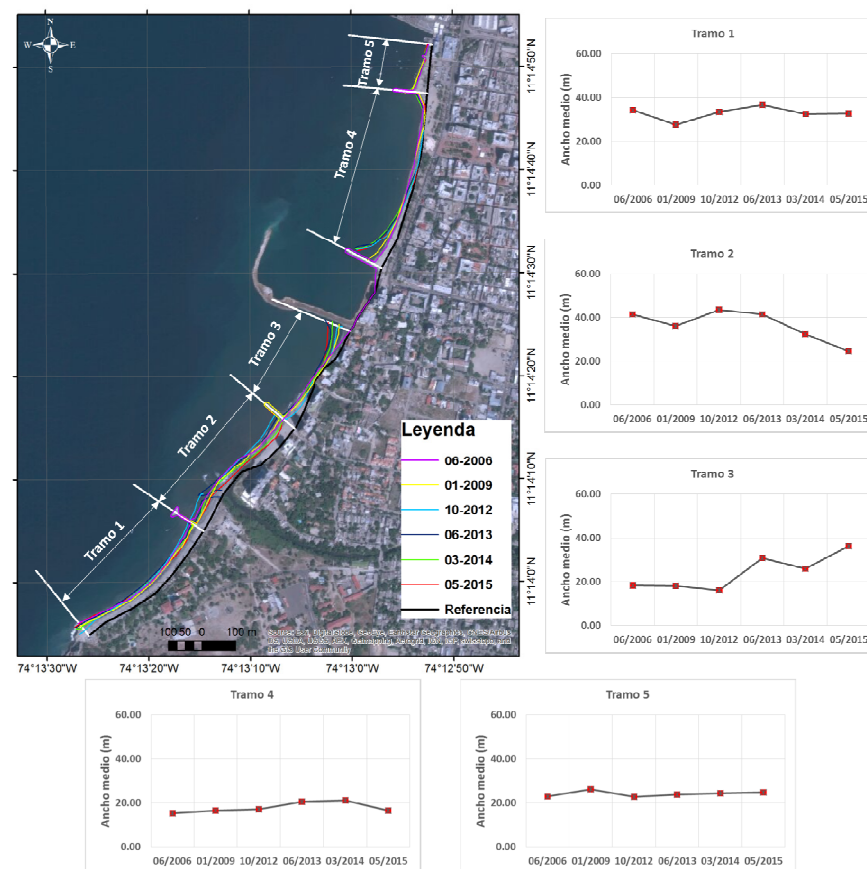


Figura 8.5. Evolución del ancho medio por tramos en las playas de bahía de Santa Marta

En la Figura 8.6 y Figura 8.7 se ilustra la evolución de ancho medio por perfiles en las playas de bahía de Santa Marta. A partir de este análisis se observa como en el perfil 4 y 5 hay un avance de la posición de la costa debido a la construcción de la Marina Internacional de Santa Marta, que ha dado lugar a dos nuevos puntos de control a partir de los cuales el oleaje se difracta, dando lugar a que el sedimento se transporte a la zona protegida. En los perfiles 8 y 9 se tiene un retroceso de la costa debido a la disminución de aporte de sedimentos del río Manzanares, y en el perfil 3 la línea de costa no puede seguir retrocediendo, pues ya no queda arena seca, con lo cual el Camellón o paseo marítimo está expuesto directamente a la dinámica marina en este punto.

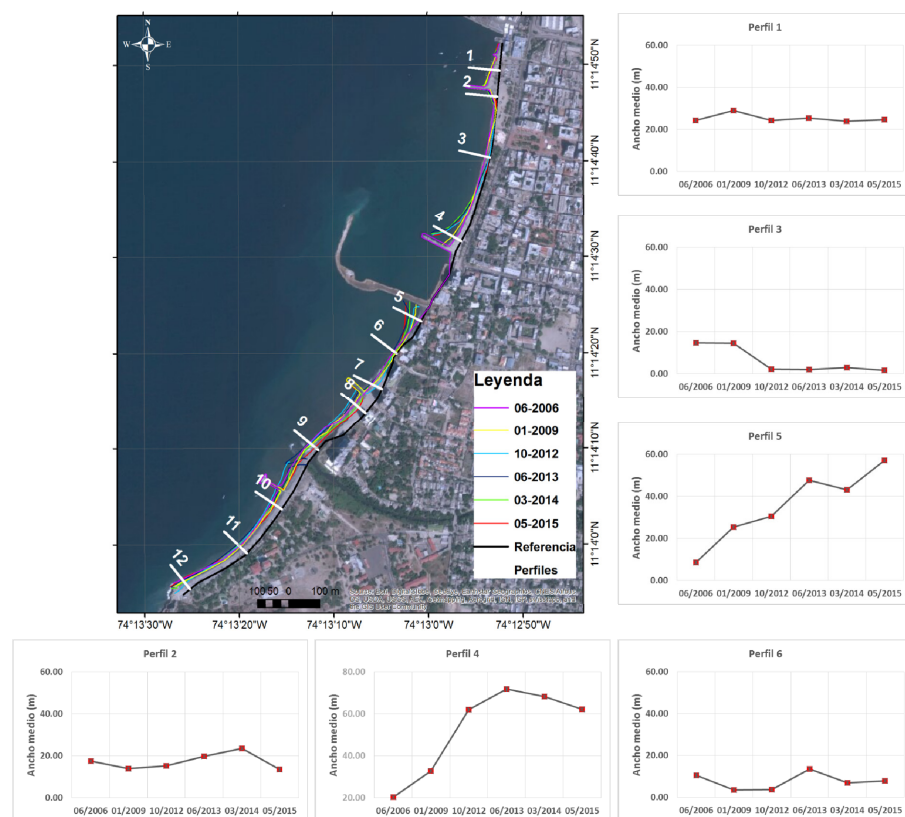


Figura 8.6. Evolución del ancho medio por perfiles en las playas de bahía de Santa Marta (Perfiles 1 a 6)

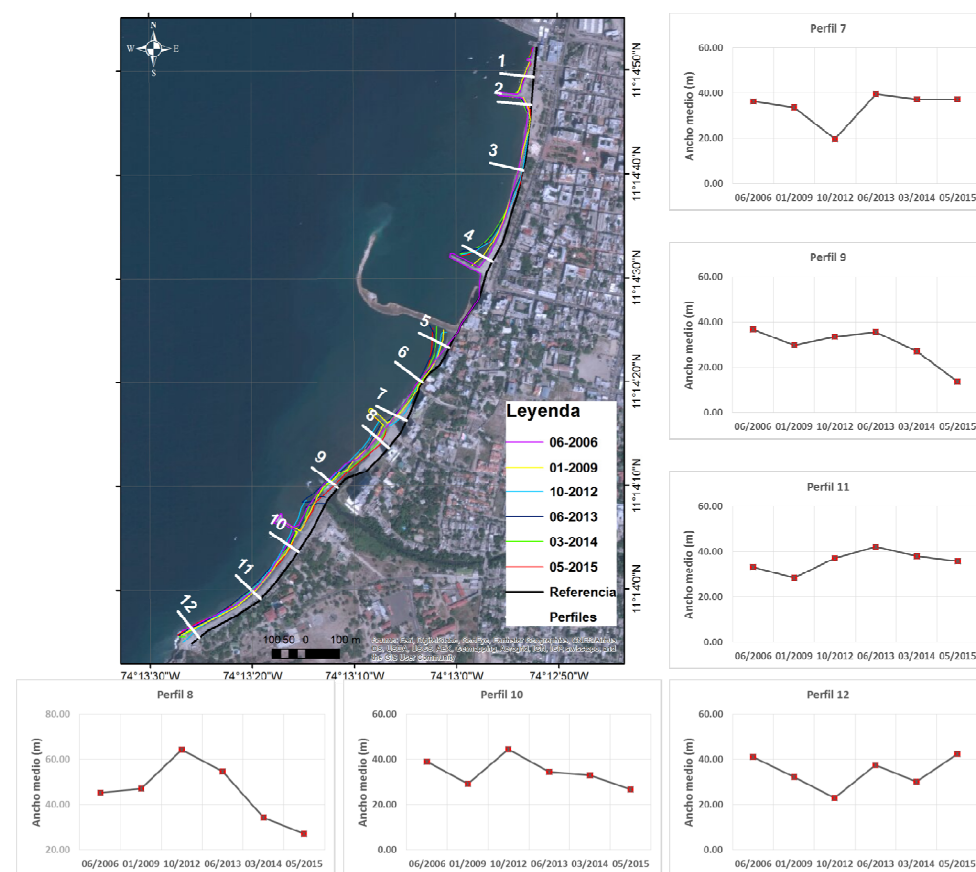


Figura 8.7. Evolución del ancho medio por perfiles en las playas de bahía de Santa Marta (Perfiles 7 a 12)

PLAYAS EL RODADERO

La Playa El Rodadero es el lugar turístico preferido por los visitantes de Santa Marta. Recibe ese nombre por su rodadero natural, formado por la arena que se desliza contra un peñasco. En la Figura 8.8 se presenta la evolución de posiciones de líneas de costa en las Playas El Rodadero, con la respectiva evolución del ancho medio de cada uno de los tramos seleccionados. En este caso se observan leves variaciones y una tendencia al equilibrio.

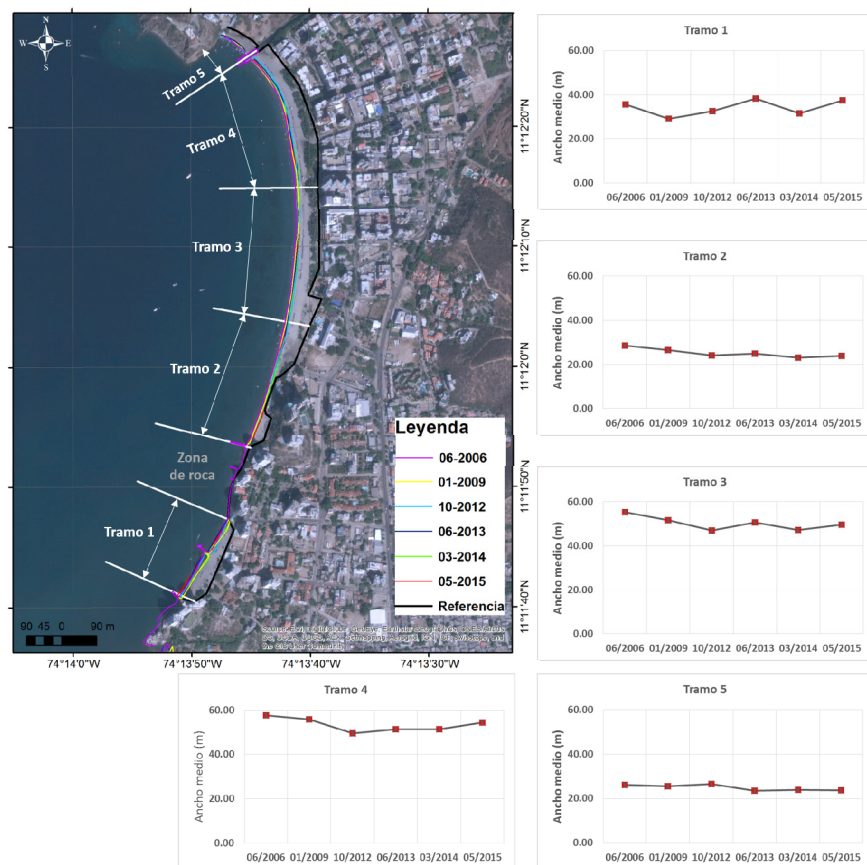


Figura 8.8. Evolución del ancho medio por tramos en Playas El Rodadero

La evolución de ancho medio por perfiles en Playas El Rodadero se presenta en la Figura 8.9.

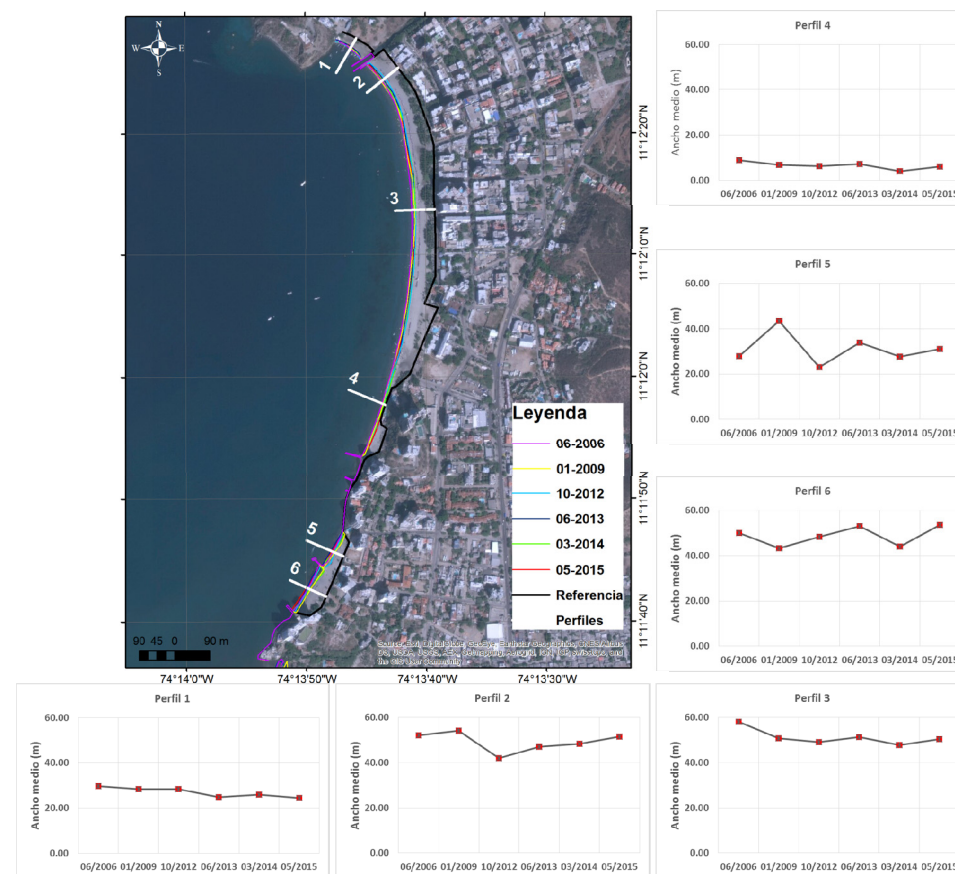


Figura 8.9. Evolución del ancho medio por perfiles en Playas El Rodadero

PLAYA SALGUERO

Finalmente se desarrolla el mismo ejercicio a lo largo de Playa Salguero. En la Figura 8.10 se muestra la evolución del ancho medio por tramos, y en el Figura 8.11 la evolución por perfiles. Es importante señalar que el tramo 3 de esta playa es el más crítico de todo el estudio, en donde se evidencia un retroceso de hasta 40 m en los últimos años.

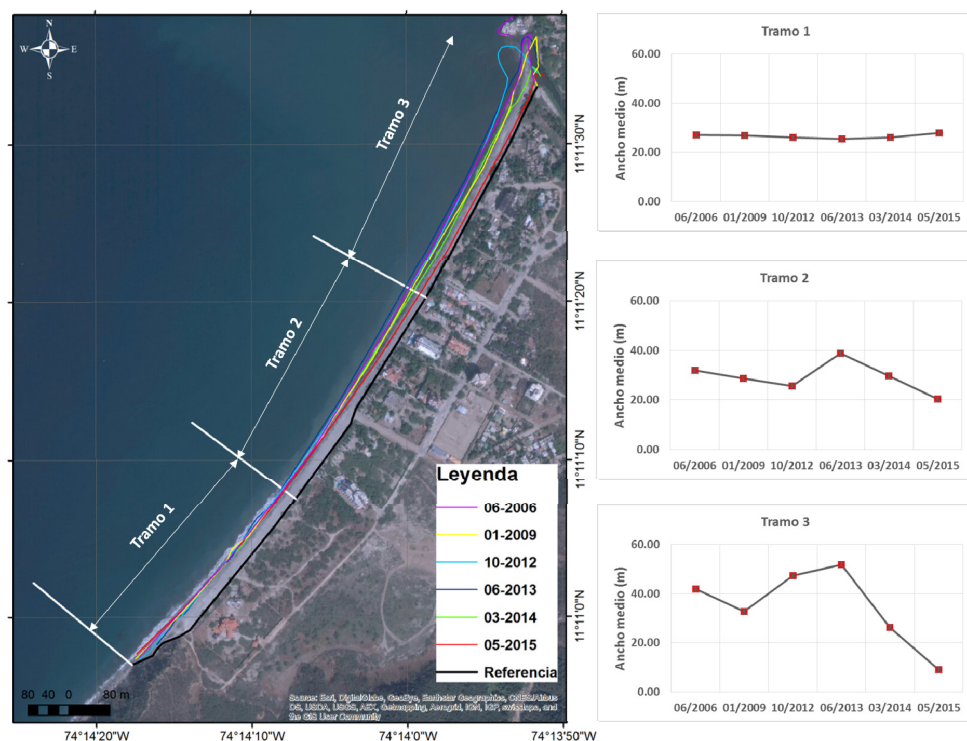


Figura 8.10. Evolución del ancho medio por tramos en Playa Salguero

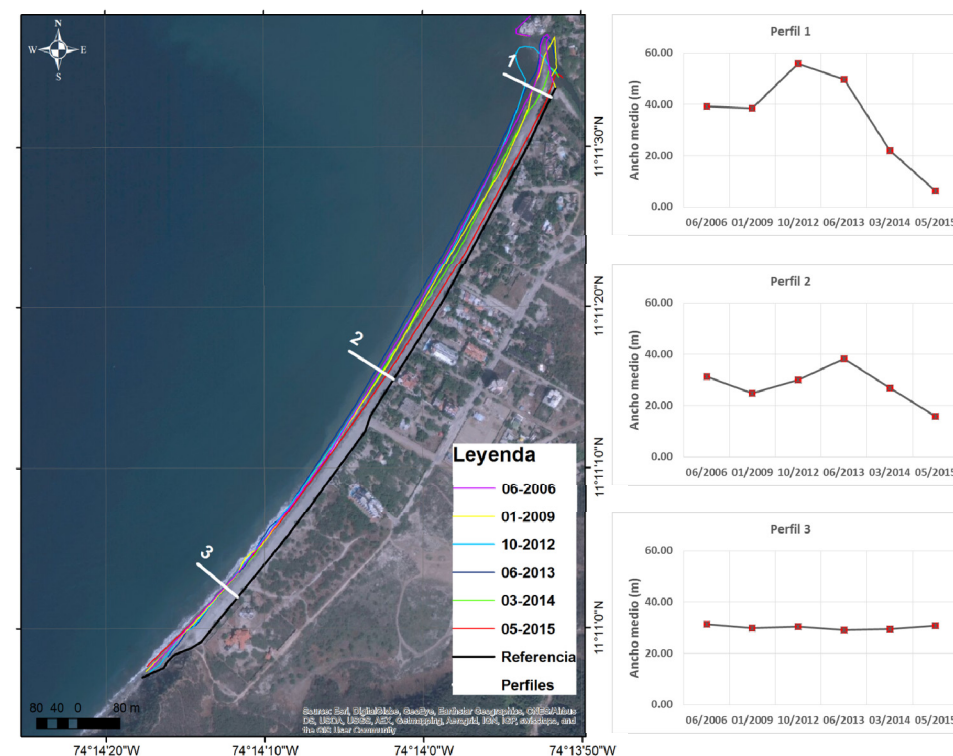


Figura 8.11. Evolución del ancho medio por perfiles en Playa Salguero

8.3.3. Eventos históricos de huracanes

Los huracanes son la amenaza natural más importante en términos generales en la región Caribe; esto debido a la gran envergadura, posiblemente, de los territorios que pueden ser impactados por un solo evento (CCRIF 2013). A pesar que Santa Marta no se encuentra en la trayectoria principal de huracanes del Atlántico, existe el potencial de ser golpeado, como lo demuestra el registro histórico de una serie de ciclones tropicales y el impacto de huracanes como Lenny en 1999.

Un ciclón tropical es un sistema de tormentas caracterizado por un centro de baja presión y vientos fuertes por lo general sobre la formación de grandes masas de agua relativamente caliente. Los ciclones tropicales que afectan Santa Marta se forman generalmente entre 9°N y 30°N en la cuenca atlántica que comprende el Océano Atlántico Norte, el Mar Caribe y el Golfo de México. Dependiendo de la velocidad del viento cerca del centro de la circulación, se clasifican en:

- Depresión tropical: vientos máximos sostenidos sobre la superficie de la tierra ≤ 62 km/h.
- Tormenta tropical: vientos máximos sostenidos sobre la superficie de la tierra en el rango de 63 km/h a 118 km/h.
- Huracán: los vientos máximos sostenidos sobre la superficie de la tierra son mayores a 118 por km/h.

En la Figura 8.12 se presentan las trazas de huracanes de categoría mayor a 2 que atraviesan un círculo con su centro situado en la ciudad de Santa Marta (-74° longitud y 11.5° latitud) y con un radio de 200 millas náuticas, obtenido de la NOAA. Estas trazas corresponden a 10 huracanes, de los cuales se destacan los más recientes: Hazel 1954, Janet 1955, Anna 1961, Lenny 1999 y Felix 2007. El huracán con mayor impacto en la costa Caribe Colombiana ha sido Lenny en noviembre de 1999 (Categoría 4), el cual afectó en el caso de Santa Marta, el camellón turístico, el Acuario de El Rodadero y en general todas las playas del litoral samario, en donde el mar de leva provocó una importante alteración de la morfodinámica de los arenales de la ciudad.

8.3.4. Tránsito de crecientes en ríos

Tal como se enunció anteriormente, el transporte de material sólido de un río se produce, fundamentalmente, bajo situaciones de avenida, por lo cual, al modificar el lecho o los contornos de los ríos, se altera el aporte sedimentario a las playas de la ciudad. Las playas objeto de estudio se ven altamente influenciadas por el aporte sedimentario del río Manzanares en la bahía de Santa Marta y el río Gaira en la bahía que lleva su mismo nombre. La caracterización del régimen de caudales extremos de los ríos de la zona puede encontrarse en el capítulo 3 de este estudio, dedicado al análisis de los riesgos de inundación.

En la historia reciente se tiene registro de eventos máximos en los años 2007 y 2010, en donde el aporte sedimentario ha sido considerable; mientras que en tiempos de sequía o presencia del fenómeno del niño, como el caso del último año 2015, se han registrado niveles mínimos de los cauces, con lo cual se redujo notablemente el aporte sedimentario a las playas, traducido en un retroceso de la posición de costa.

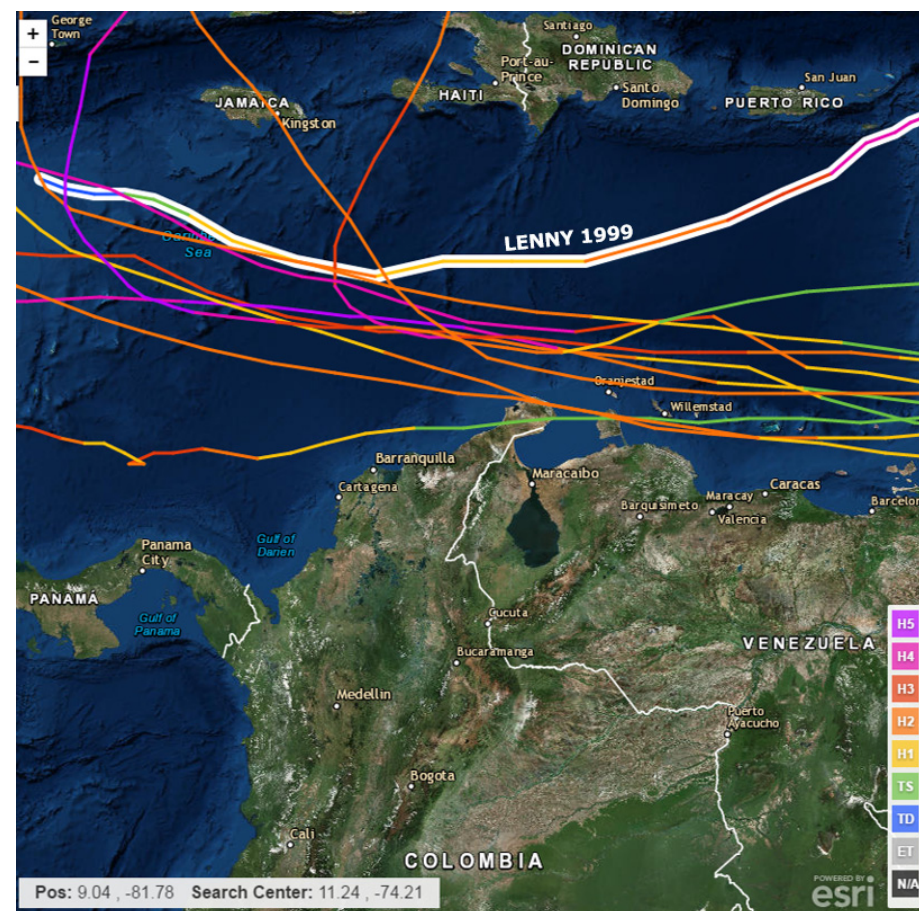


Figura 8.12. Trazas de huracanes superiores a categoría 2 cercanos a Santa Marta. Tomado de www.coast.noaa.gov

8.4. Dinámica marina

En este apartado se analiza la dinámica marina que en mayor medida gobierna la estabilidad de las playas de la zona de estudio. Esto es, el oleaje y el sistema de corrientes de rotura inducido por éste. Previamente, y dado que el oleaje que alcanza la zona de estudio está condicionado por el oleaje existente en aguas profundas y por la propagación del mismo hasta la costa, se analizarán las características de dicho oleaje en profundidades indefinidas. Posteriormente, se estudiará la dinámica marina a lo largo del litoral samario.

Para propagar las ondas hasta aguas someras y obtener las condiciones de oleaje a pie de playa se utiliza el modelo OLUCA, incluido en el Sistema de Modelado Costero (SMC), desarrollado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria). El SMC consiste en una serie de modelos numéricos específicamente diseñados para seguir la metodología propuesta en el documento de ingeniería: “*Beach Nourishment Design and Evaluation Methodology*”, SBM (González et. al (2007)).

8.4.1. Oleaje en profundidades indefinidas

A continuación se describe la información de partida para propagar el oleaje desde profundidades indefinidas hacia aguas someras. Estos datos corresponden a la batimetría sobre la que se ha de propagar el oleaje, y la fuente de información con el registro de estados de mar en proximidades a Santa Marta.

8.4.1.1. Datos de partida

• BATIMETRÍA

La batimetría utilizada en el presente estudio corresponde a información obtenida a partir de la georreferenciación y digitalización de las siguientes cartas náuticas del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de Colombia - CIOH (Figura 8.13):

- Batimetría General:

- Carta 406 – Escala 1:100.000
- Carta 407 – Escala 1:100.000

- Batimetría de Detalle:

- Carta 804 – Escala 1:10.000
- Carta 244 – Escala 1:25.000

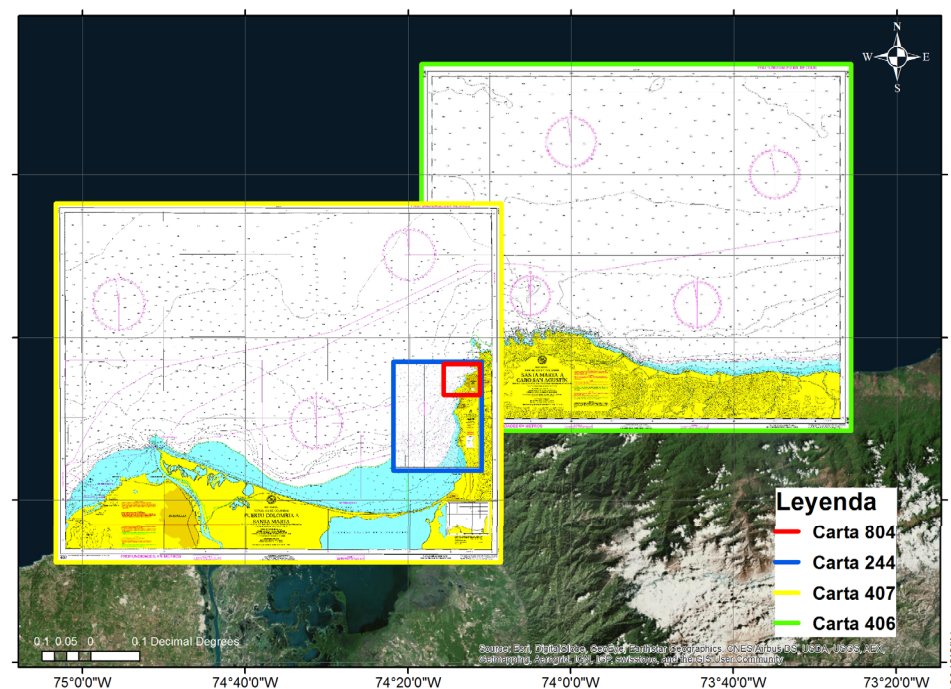


Figura 8.13. Cartas náuticas del CIOH empleadas

En la Figura 8.14 se presenta la superficie batimétrica consolidada a partir de la información obtenida de las cartas náuticas.

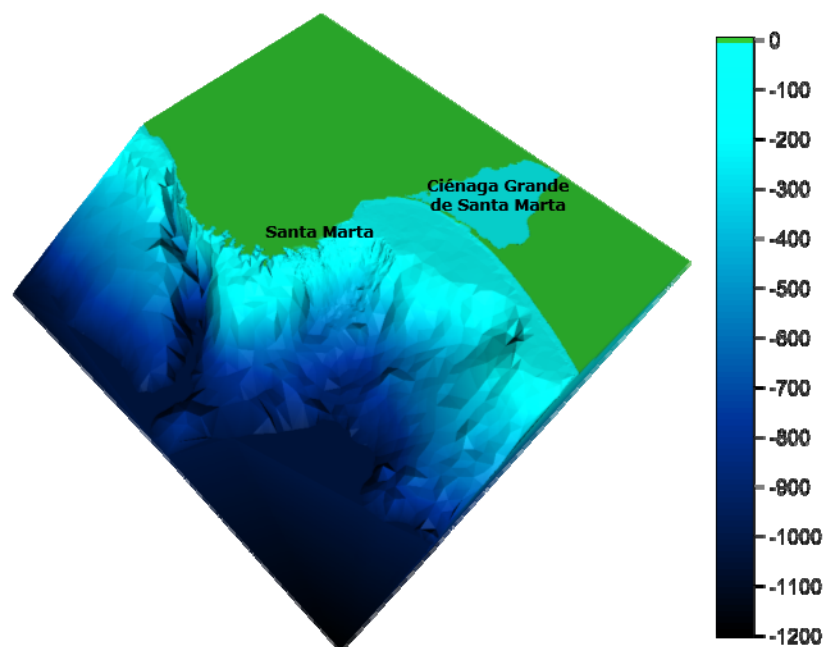


Figura 8.14. Superficie batimétrica del entorno de Santa Marta

• DATOS DE REANÁLISIS DEL IHCANTABRIA

Se ha seleccionado un punto de oleaje GOW (*Global Ocean Waves*), propiedad del IHCantabria, y es resultado de un reanálisis global mediante la simulación numérica de las condiciones de oleaje durante un periodo largo sobre la superficie de los océanos del planeta usando forzamientos atmosféricos globales. En la zona Caribe se cuenta con malla de resolución 0.25°, y el resultado obtenido consiste en un conjunto de series horarias de estados de mar en cada uno de los nodos de la malla. Por su resolución espacial y temporal, así como por la alta calidad de las series obtenidas, se consideran bases de datos óptimas para este tipo de estudios.

Para la obtención del oleaje en aguas profundas próximas a Santa Marta, se han empleado los datos de oleaje (altura de ola significativa, periodo de pico y dirección media) de la base de datos generada numéricamente por el IHCantabria en el punto de

coordenadas: latitud 11.5°N y longitud 74°W. Los datos se han obtenido con periodicidad horaria desde febrero de 1948 hasta diciembre de 2008.

En la Figura 8.15 se presenta la caracterización climática del punto GOW, con la respectiva rosa direccional de Hs, Tp, la serie de tiempo de altura de ola significativa, y la tabla de estadísticos básicos por direcciones. El oleaje reinante o más frecuente en profundidades indefinidas es proveniente del NE; mientras que el oleaje dominante, o máximo es del NNE.

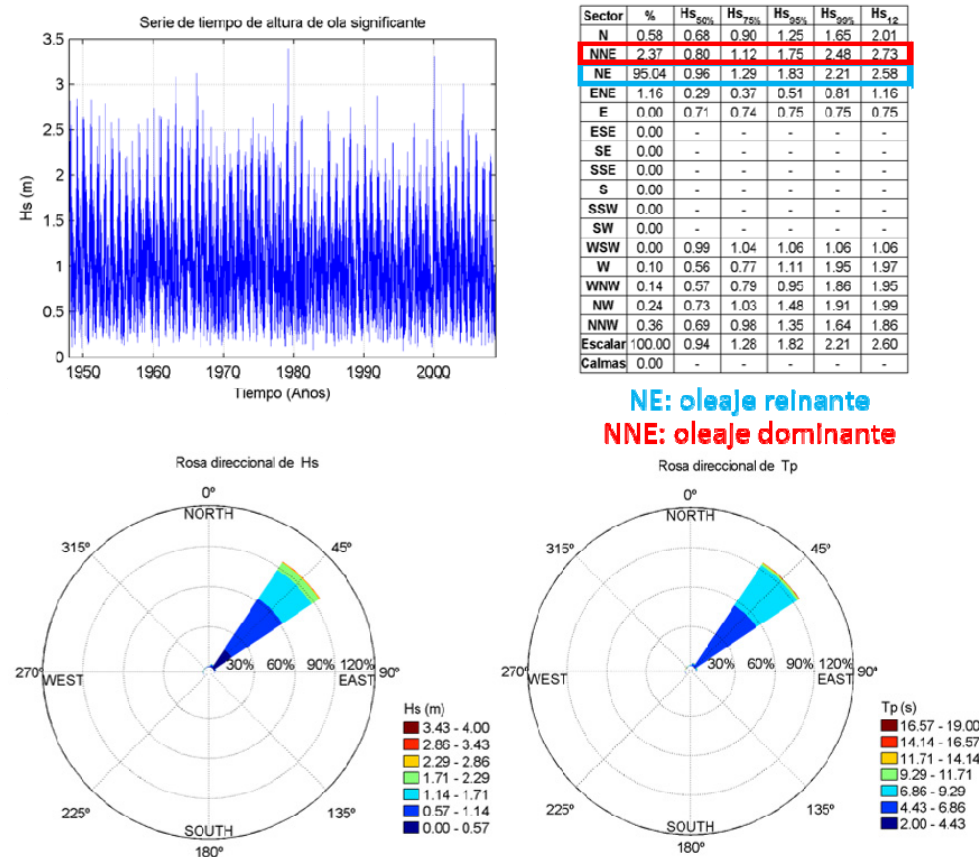


Figura 8.15. Caracterización del oleaje en aguas profundas

A partir de series de reanálisis horarias de datos de marea astronómica del banco de datos GOT (*Global Ocean Tides*), generada por el IHCantabria, de 60 años de duración, se tiene que la costa objeto de estudio presenta un régimen de marea astronómica micro-mareal (Davies, 1964) con oscilaciones máximas del orden de 0.45 m.

8.4.2. Oleaje en profundidades someras

Al propagarse el oleaje hacia la costa, se producen fenómenos de modificación de los frentes de onda y, por tanto, de distribución espacial de la energía del oleaje refracción, difracción, reflexión, asomeramiento, disipación de energía por fondo, etc. Al objeto de caracterizar correctamente la dinámica del oleaje en la zona de estudio, se hace necesario propagar los oleajes existentes en aguas profundas hacia la zona de interés.

A partir de profundidades indefinidas, se ha utilizado el Modelo de Propagación de Oleaje y Corrientes (OLUCA), incluido en el SMC. Dicho modelo OLUCA es capaz de simular los procesos de refracción, difracción, reflexión, asomeramiento, disipación de energía por fondo, etc., tanto para oleaje monocromático como para oleaje espectral, resolviendo la forma parabólica de la ecuación de pendiente suave (*Mild Slope*) e incorpora modelos de propagación no lineales, simulación de capa límite turbulenta o laminar, la rugosidad del fondo, entre otros factores.

A continuación se presenta el sistema de mallas diseñadas como encadenamiento de mallas generales (resolución de 100 m) y de detalle (resolución de 25 metros), en las cuales se ha tenido en cuenta la dirección del oleaje, la orientación de la costa y los distintos accidentes geográficos y obras marítimas que pueden influir en la propagación del oleaje hacia la costa (cañones, bajos, cabos, diques, entre otros).

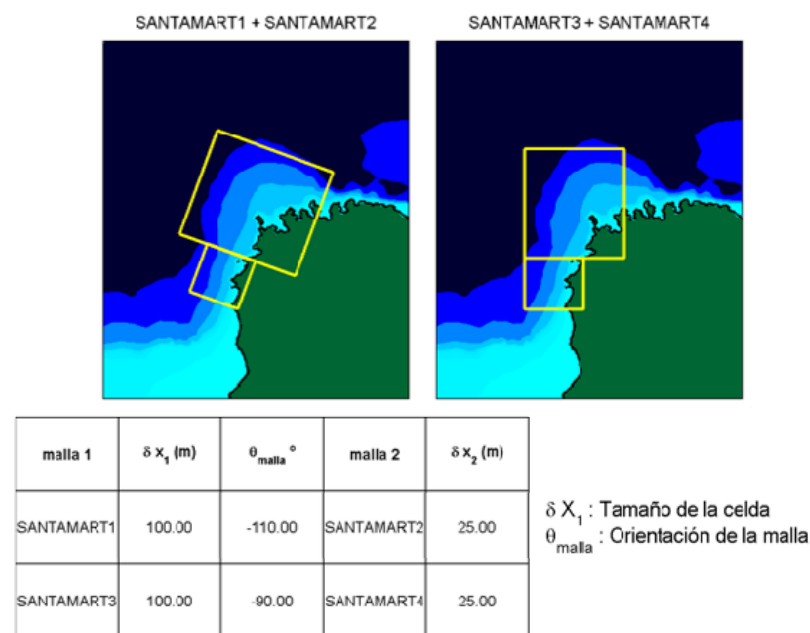


Figura 8.16. Mallas empleadas en la propagación de la serie GOW

Al objeto de poder transferir la serie temporal de oleaje desde profundidades indefinidas a distintos puntos a pie de playa en la zona de estudio, se han propagado 100 casos de oleaje espectral. La selección de estos 100 casos entre los 582168 estados de mar del periodo 1948-2014, ha sido mediante el algoritmo de máxima disimilitud (MaxDiss).

Los algoritmos de máxima disimilitud consisten en la selección de un subconjunto de datos representativo de la muestra de datos de partida. El algoritmo comienza con la inicialización del subconjunto mediante la transferencia de un dato de la base de partida (en este caso el elemento de mayor altura de ola) y la selección del resto de elementos se realiza iterativamente, transfiriendo al subconjunto, en cada ciclo, aquel dato perteneciente a la base de datos de partida con la mayor disimilitud respecto al subconjunto seleccionado. En la Figura 8.17 se ilustra la representación gráfica de la clasificación MaxDiss de los casos seleccionados para propagar.

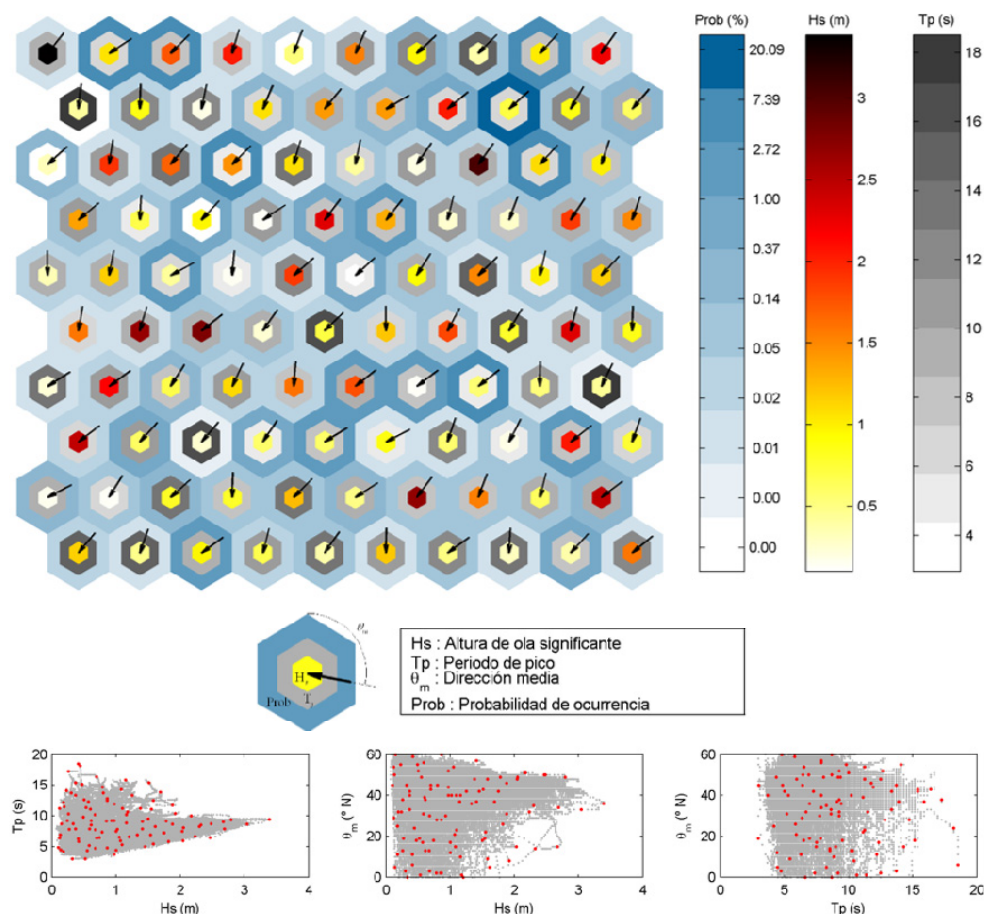


Figura 8.17. Clasificación MaxDiss de los casos seleccionados a propagar

Como ejemplo se presenta en la Figura 8.18 la propagación de oleaje de temporal en la dirección reinante. Se observa como la Isla Aguja al norte de Santa Marta permite la protección del oleaje del primer cuadrante. La menor magnitud de oleaje llega a la Cala de Taganga y las Playas de El Rodadero.

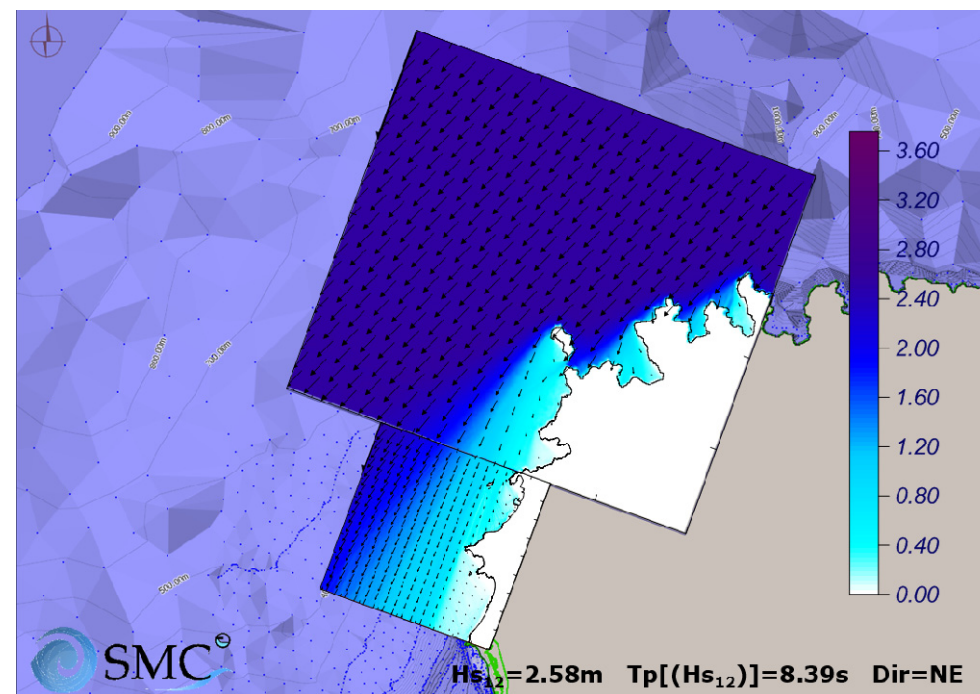


Figura 8.18. Propagación de oleaje de temporal en dirección reinante (NE)

Por otro lado, en la Figura 8.19 se ilustra la propagación del oleaje provocado por el huracán Lenny en 1999 desde aguas profundas hasta la costa. Este oleaje incidió aproximadamente con dirección normal al litoral samario, por lo cual su impacto ha sido directo en las costas de Santa Marta con alturas de ola significativa superiores a 3 m.

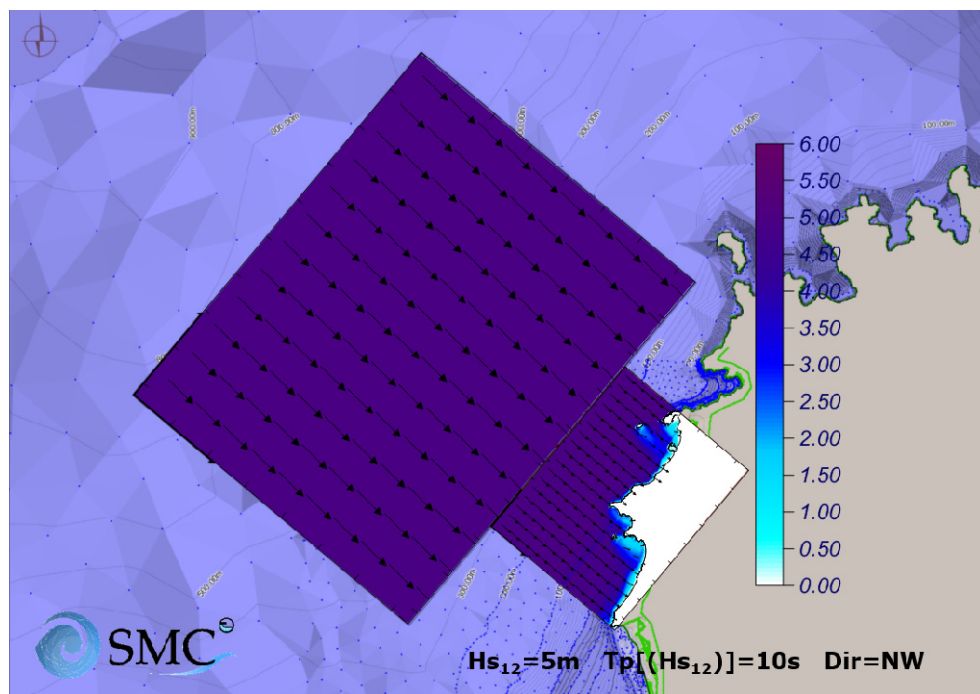


Figura 8.19. Propagación de oleaje provocado por el Huracán Lenny 1999

A partir de los resultados de la propagación de los casos seleccionados, es posible reconstruir la serie en distintos puntos de interés localizados a lo largo de la costa, mediante la aplicación de una técnica de interpolación. La técnica de interpolación elegida es la denominada RBF, funciones de base radial (*Radial Basis Function*, RBF), que permite trabajar con datos de alta dimensionalidad y no distribuidos uniformemente. Se ha calculado una función RBF para cada parámetro propagado de interés (altura de ola significativa, periodo de pico y dirección). De esta manera, a partir de las correspondientes funciones RBF se obtienen las series de reanálisis transferidas desde aguas profundas a puntos objetivos.

8.5. Diagnóstico de la situación actual

La situación actual de las playas de bahía de Santa Marta, Playas El Rodadero y Playa Salguero, es el resultado de los cambios que ha sufrido el litoral debido a la construcción de diversas obras en su entorno. Estas obras, junto con la consiguiente disminución de los aportes sedimentarios en toda la zona fisiográfica, han contribuido a crear una situación de inestabilidad de la zona de estudio.

Como se enunció anteriormente, el uso de las playas de Santa Marta es fundamentalmente turístico, y todas cuentan con fácil accesibilidad desde paseos marítimos, condominios o zonas hoteleras.

A continuación se expone el diagnóstico de la situación actual de cada una de las playas objeto de estudio:

• PLAYAS BAHÍA DE SANTA MARTA

En la bahía de Santa Marta se encuentran las playas de San Fernando, Playa Los Cocos y Playa del Centro, orientadas al NW con un tamaño medio de sedimento $D_{50} = 0.26$ mm. Estas han sido las playas más intervenidas en los últimos años por obras como la Marina Internacional de Santa Marta, nuevos espolones o diques, y actuaciones de regeneraciones de playa. Dichas obras impidieron la deriva natural de sedimentos, modificando cada unidad de playa y acelerando procesos de erosión hacia el suroeste. A partir del presente estudio se concluye que:

- Las playas están protegidas del oleaje del primer cuadrante por la presencia de la Isla del Morro y Punta Betín.
- Al norte de la desembocadura del río Manzanares, la Playa Los Cocos ha retrocedido más de 20 m a causa del déficit de aporte sedimentario por parte del río Manzanares en los últimos años. De la misma forma, esta falta de aporte afecta la Playa San Fernando en donde el retroceso es cercano a 10 m en proximidades al muelle militar.

- La construcción de la Marina Internacional dio lugar a dos puntos de difracción del oleaje, por lo cual el sedimento se apoya en ambos costados. En el costado sur (Ver Perfil 5 de Figura 8.6) el avance de playa seca es de casi 50 m entre 2006 y 2015; mientras en el costado norte (Ver Perfil 4 de Figura 8.6) el avance es cercano a 40 m.
- A partir de lo anterior, la Playa del Centro ha perdido su arena seca en la porción central en frente al Camellón o Paseo Rodrigo de Bastidas, por lo que se limita su uso de solárium en los extremos de la playa.
- La playa situada en el extremo norte, contiguo a la zona portuaria, está en condiciones estables, sin muestra de procesos de erosión (Tramo 5 en Figura 8.5).

En la Figura 8.20 se presenta un esquema del modelo de funcionamiento de la bahía de Santa Marta.



Figura 8.20. Modelo de funcionamiento en la bahía de Santa Marta

Dada la amplitud de la bahía del Gaira se ha dividido la misma en Playas El Rodadero al norte de la desembocadura del río Gaira, y Playa Salguero al sur de la desembocadura; ambas playas con tamaño medio de sedimento $D_{50} = 0.22 \text{ mm}$.

El Rodadero es la playa más visitada en Santa Marta y uno de los balnearios más representativos de Colombia. En la evaluación de la situación actual, se concluye:

- La bahía de Gaira está protegida del oleaje del primer cuadrante gracias a los promontorios rocosos de Punta del Gaira, Punta Cabeza de Negro y la isla conocida como Morro del Gaira (Ver Figura 8.1). Así entonces, la playa está en zona de sombra al oleaje dominante y reinante, con lo cual, bajo temporales de esta dirección, la altura de ola que alcanza la bahía es inferior a 1 m.
- La playa presenta una situación de equilibrio “dinámico” la mayor parte del tiempo debido a la baja tasa de transporte litoral. Esta playa sólo estaría inestable bajo condiciones de fuertes temporales, provenientes principalmente del sector NW, que inciden directamente en la costa.
- En el extremo norte contiguo al canal de La Escollera se tiene una pequeña playa muy protegida del oleaje por lo cual se encuentra en situación de estabilidad.
- Playa Colón al extremo sur está al límite de su estabilidad, con lo cual la profundidad de cierre del perfil activo, h^* , conocida como la profundidad a partir de la cual el transporte de sedimentos en perfil es despreciable, está contenido; siendo h^* cercano a 1 m.

En la Figura 8.21 se presenta un esquema del modelo de funcionamiento de Playas El Rodadero.



Figura 8.21. Modelo de funcionamiento de Playas El Rodadero

PLAYA SALGUERO

En general Playa Salguero es la más inestable de la zona, encontrándose en desequilibrio con pérdida neta de arena hacia el SW en la actualidad. En la Figura 8.22 se presenta el modelo de funcionamiento de la playa. Se resaltan las siguientes conclusiones:

- La tasa de transporte en Playa Salguero es entre 3.000 y 7.000 m³/año hacia el SW, con lo cual la arena se pierde hacia el extremo sur, en donde la playa está en su máximo alcance. Por este motivo, la playa depende del aporte sedimentario del río Gaira.
- El extremo norte próximo a la desembocadura del río Gaira ha perdido hasta 40 m de playa seca en los últimos años, por lo cual en esta zona queda limitada playa seca para uso de solárium.
- A futuro se diagnostica que de continuar las condiciones actuales, la tendencia es a perder cada vez más volumen de sedimento hasta quedar sin arena seca en la zona norte.



Figura 8.22. Modelo de funcionamiento de Playa Salguero



9. REFERENCIAS

- CCRIF (2013) “CCRIF ANNUAL REPORT 2012-13” Caribbean Catastrophe Risk Insurance Facility (CCRIF). Cayman Islands.
- Davies, J.L. (1964). “A morphogenetic approach to world shorelines”. Zeitschrift für Geomorphologie, 8, pp. 127-142.
- Díaz Rocca, L. H., Causado Rodriguez, E., (2007). La insostenibilidad del desarrollo urbano: El caso de Santa Marta – Colombia. Revista Clío América. Vol. 1, núm. 1.
- FINDETER, (2016). Diagnóstico de Santa Marta. Cuaderno Santa Marta Sostenible 2016. Financiera de Desarrollo Territorial S.A. FINDETER.
- González, M., Medina, R., Gonzalez-Ondina, J., Osorio, a., Méndez, F. J., & García, E. (2007). An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. Computers & Geosciences, 33(7), 916–931.
- Saldarriaga, J., Siabatto, L., Cotes, L., Madrid, N., Duque, N. y Cifuentes, G. (2015). Resultados de los estudios de abastecimiento de agua para Santa Marta. Bogotá D.C.: Financiera de Desarrollo Territorial S.A. FINDETER. Proyecto “Estudio para el Fortalecimiento de la Infraestructura Sanitaria de Santa Marta para los Requerimientos Proyectados en los Próximos 50 Años”.

