

Detección de inundaciones con sensores remotos en Ciénaga, Magdalena

COLOMBIA | Mayo 2024



DetECCIÓN DE INUNDACIONES CON SENSORES REMOTOS EN CIÉNAGA - MAGDALENA

Análisis del área urbana en Ciénaga, Magdalena.

COLOMBIA | Mayo 2024

CONTEXTO

Ciénaga, dada a su ubicación geográfica estratégica, se ubica como un eje de tránsito crucial en la región Caribe colombiana, conectando departamentos como Magdalena, La Guajira, y Atlántico. No obstante, la persistente violencia y el prolongado conflicto armado interno han dejado profundas huellas en la comunidad, destacándose los desplazamientos forzados que perturban significativamente la estabilidad y el bienestar de las comunidades locales¹. Esta situación se ve agravada por la escasez de servicios esenciales como salud, educación y oportunidades de empleo, impactando de forma negativa los medios de vida de la población, especialmente en áreas urbanas. Además, estos desafíos se intensifican con las inundaciones recurrentes que azotan el municipio, aumentando la vulnerabilidad de la población y complicando aún más su situación socioeconómica y ambiental².

De acuerdo con seguimiento de mediciones de precipitaciones, desde el año 2012 a la actualidad, se observa un aumento significativo en la intensidad de la precipitación máxima. Períodos de precipitaciones cortos y por encima del promedio mensual de milímetros mensuales han provocado inundaciones en el área urbana. A pesar de las proyecciones que anticipaban una sequía debido al fenómeno de El Niño, se experimentó un período de lluvias más intensas de lo habitual. Esto ha sobrepasado la capacidad de la infraestructura hidráulica de la ciudad, causando inundaciones extensas en la mayoría de la zona urbana. Para evaluar la frecuencia y extensión de estas inundaciones, se utilizaron sensores remotos, enfocándose específicamente en la detección y modelación de las inundaciones durante fechas de eventos críticos: el 14 de noviembre de 2017, el 10 de junio de 2021 y el 8 de julio de 2023³.

El análisis rápido de inundaciones en poblaciones vulnerables tuvo como uno de sus objetivos centrales identificar las zonas susceptibles a sufrir inundaciones, con el fin de establecer prioridades y áreas críticas para la intervención. Entre los hallazgos se exponen datos apróximados de las poblaciones expuestas a inundaciones se proporcionaron datos relevantes sobre los impactos en la población y el incremento de su vulnerabilidad. Para ello, se emplearon técnicas de sensores remotos a través de Google Earth Engine (GEE). Los resultados resaltan tres aspectos críticos: i) inundaciones causadas por precipitaciones intensas, ii) inundaciones resultantes de huracanes, e iii) identificación de las poblaciones más amenazadas a lo largo de las series temporales estudiadas.

MENSAJES CLAVES

- Según la Evaluación Basada en Área de Ciénaga, el 62% de los hogares reportaron que las inundaciones afectan algunas calles y viviendas en el barrio, con una duración promedio de 1 a 3 días según el 37% de los hogares encuestados.
- Las áreas densamente pobladas son las más susceptibles a desastres por inundación, posiblemente debido a factores como la disponibilidad de viviendas asequibles, la proximidad a fuentes de empleo o la falta de regulación estatal en el acceso a la tierra.
- En escenarios de aumento del agua sobre el nivel del mar de hasta 1 metro, se generan efectos de inundación en 7.000 hectáreas, lo que corresponde al 20% del área urbana, con afectaciones sobre más del 30% de la población residente en este municipio.

CONTENIDO

Contexto	2
Mensajes Claves	2
Metodología y cobertura	3
Metodología	3
Contexto Territorial	4
Modelo digital de elevación de Ciénaga	4
Cobertura de la tierra	5
Variabilidad cobertura de la tierra desde el año 2018 al 2023	5
Tendencia de la cobertura de la tierra entre 2018, 2020 y el 2023	5
Mapa cambio de cobertura de la tierra entre los años 2018 y 2023	6
Contexto climático	7
Gráficos precipitación promedio anual y mensual desde 2010 al 2023	7
Gráficos de precipitación máxima anual desde el 2010 al 2023	7
Modelamiento de inundación	8
Mapa modelamiento de inundaciones entre los años 2017 - 2020 - 2023	8
Mapa de modelamiento de inundación en Cienaga - Proyección al 2040	9
Mapa de inundación por efectos de subida del nivel por huracanes	10
Conclusión	11

1. Memorias de sabana y ciénaga: aporte al esclarecimiento desde los sujetos de reparación colectiva en la zona norte y centro del Magdalena (CODHES)

2. Tomado de medios de comunicación nacional, fecha 14 de noviembre del 2017, 10 de junio del 2021 y el 8 de junio del 2023.

3. Tomado de la Unidad Nacional de Riesgos y Desastres del municipio de Ciénaga (2021).



METODOLOGÍA

La metodología empleada en este estudio se fundamenta en un modelo de inundaciones por precipitaciones, el cual incorpora metodología de sensores remotos. De forma complementaria, se utiliza un modelo cartográfico que estima el incremento del nivel del agua a través de escenarios de 1 metro hasta 4 metros, en eventos de huracanes.

De acuerdo con lo anterior, el modelamiento rápido de inundaciones se hizo a través de imágenes de radar de apertura sintética (SAR)⁴ analizadas en GEE, a través de un script de UN-SPIDER⁵, el cual identifica áreas susceptibles a inundación en áreas urbanas y áreas con vegetación acuática, que se apoyan en el método de entrenamiento de random forest⁶, e incluyen la identificación de cuerpos de agua permanentes presentes durante al menos 11 meses⁷ como criterio de exclusión de áreas. Finalmente, se consideró la densidad poblacional y el análisis del cambio de coberturas con el objetivo de estimar las áreas afectadas y años de mayor extensión del área urbana vs área con aguas. Como método de validación del modelamiento, se empleó la matriz difusa, la cual se basa en el conteo de píxeles clasificados correctamente y utiliza un entrenamiento de clasificación manual como referencia.

En lo referente a la identificación de la población expuesta, se procedió al cálculo utilizando datos provenientes del Global Human Settlement Layer - GHSL, accesibles a través del Joint Research Centre Data Catalogue de la Unión Europea. Esta fuente de información proporciona la densidad poblacional actualizada a una resolución de 150 mts, desde la fecha de inicio del estudio año a año hasta el año 2023, considerando la densidad poblacional al área de consulta vinculada en el estudio. Este enfoque garantiza la precisión y actualización necesarias para evaluar de manera efectiva la exposición de la población en el contexto de nuestro análisis científico.

COBERTURA

Área de evaluación



4. El radar de apertura sintética o SAR (Synthetic Aperture Radar) es un tipo de sensor produce su propia energía y luego registra la cantidad de esa energía reflejada tras interactuar con la Tierra, capas de reflectar energía a través de superficies de agua o artificiales (<https://www.earthdata.nasa.gov>).

5. Tomado de UN-SPIDER.

6. Random forest: es un método de clasificación para inteligencia artificial popular debido a la capacidad para obtener buenos resultados reducido de muestras de entrenamiento y porque se basa en un número reducido de parámetros definidos por el usuario ([https:// http://www.eo4geo.eu/](https://http://www.eo4geo.eu/)).

7. Tomado de Joint Research Center Data Catalogue.



En la última década, hemos sido testigos de cambios climáticos a nivel mundial, con variaciones marcadas en las precipitaciones y la temperatura entre distintas regiones. Estos cambios impactan los patrones meteorológicos y, consecuentemente, los ecosistemas⁸. Entre ellos, destaca el aumento del nivel del mar, principalmente atribuido a las contribuciones de glaciares y capas de hielo⁹. De acuerdo con Nerem¹⁰, las proyecciones indican que para el año 2100 el incremento podría alcanzar los 65 cm. Los océanos reflejan los efectos de este fenómeno global, manifestándose en el calentamiento, el aumento del nivel del mar a causa de emisiones de CO2 derivadas de actividades humanas¹¹.

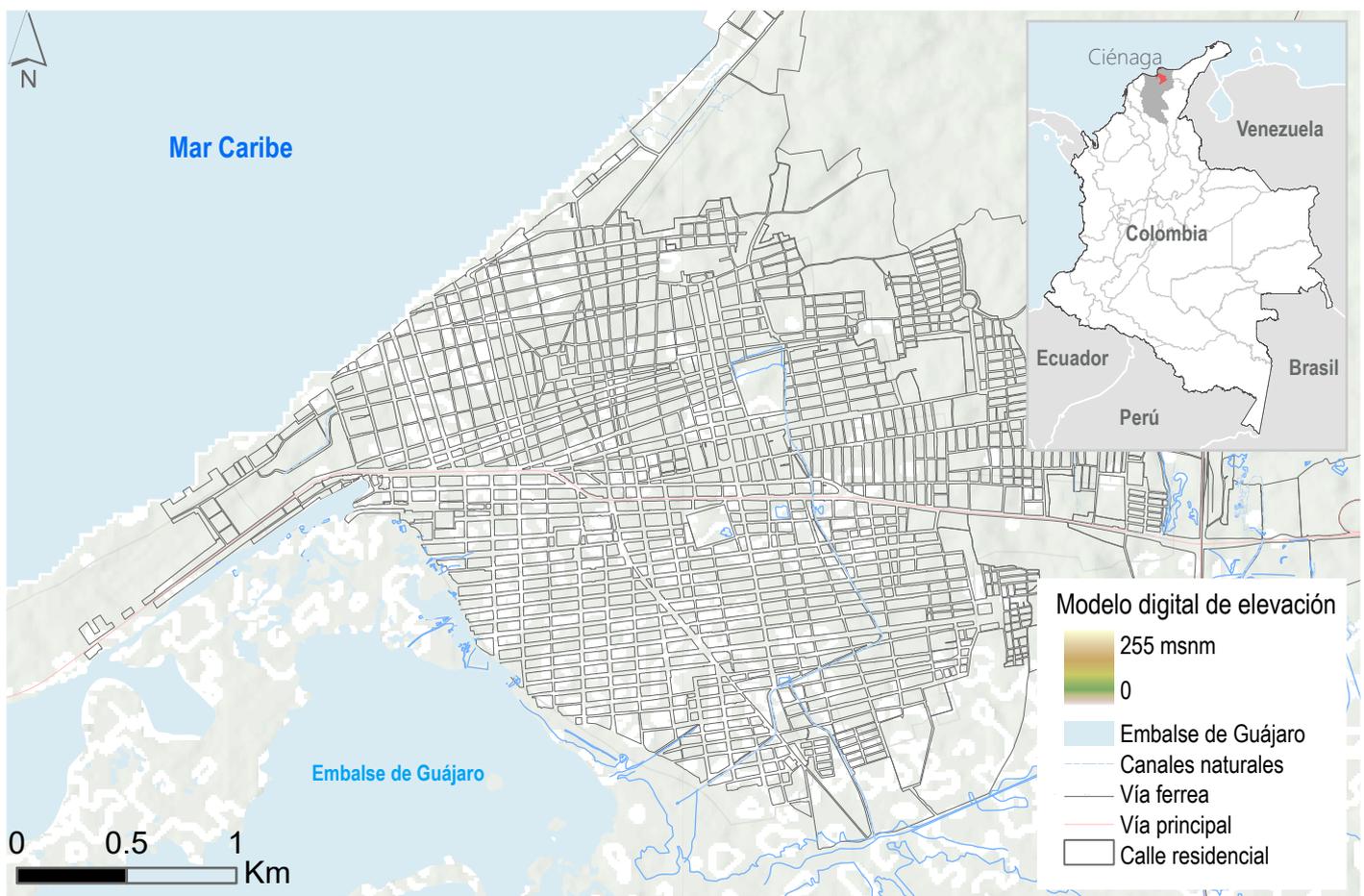
Este fenómeno global está íntimamente ligado a las variaciones climáticas a lo largo del tiempo, conocidas como variabilidad climática. Se monitorean las llamadas anomalías climáticas, identificadas por valores fuera de lo normal, según Montealegre (2009). La evaluación de esta variabilidad se logra al determinar estas anomalías.

En el contexto específico de Colombia, las preocupaciones por el cambio climático se centran en las condiciones geográficas y socioeconómicas, especialmente en poblaciones vulnerables de la costa Atlántica y Pacífica, como la zona de Ciénaga. Ubicada estratégicamente entre el mar Caribe y la Ciénaga Grande de Santa Marta, esta ciudad se encuentra en una posición única en el departamento de Magdalena, enfrentando desafíos particulares en una región que alberga la mayor extensión de agua dulce en las costas colombianas.

El siguiente mapa muestra la altimetría de la ciudad de Ciénaga, que se encuentra ubicada entre el mar Caribe y el embalse Guajaro, este último formando parte de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Un aspecto destacado del análisis altimétrico revelado en el mapa es que la ciudad tiene una altitud máxima de 3 metros sobre el nivel del mar, con la mayor parte de la superficie por debajo de 0 hasta 3 metros. Además, tiene infraestructura hidráulica en términos de desarrollo y funcionalidad deficiente.

Modelo digital de elevación

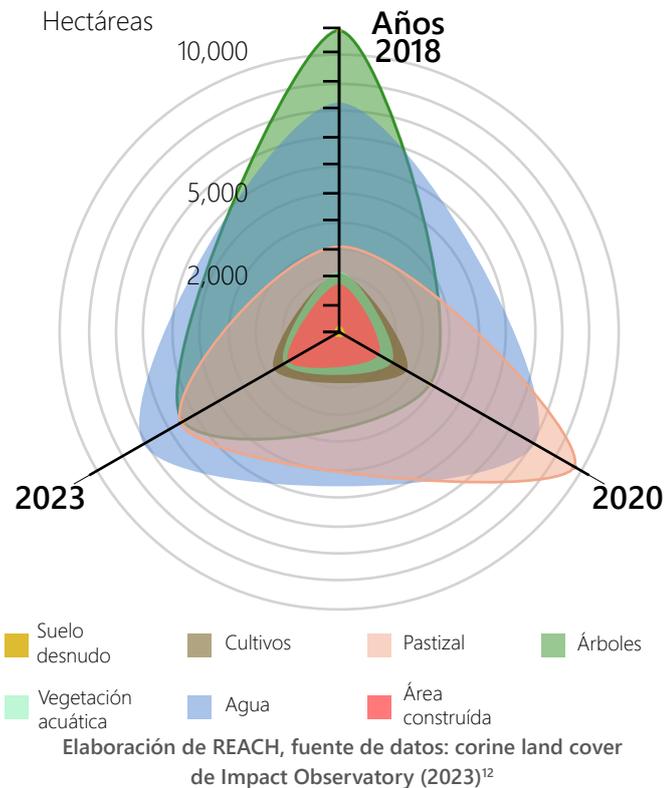
Modelo digital de elevación



8. Tomado de Climate Science, 2030.
 9. Tomado de IPCC, 2019.
 10. Tomado de Nerem, 2018.
 11. Tomado de Banco Mundial, 2022.



Variabilidad en la cobertura de la tierra en Ciénaga desde el año 2018 al 2023:

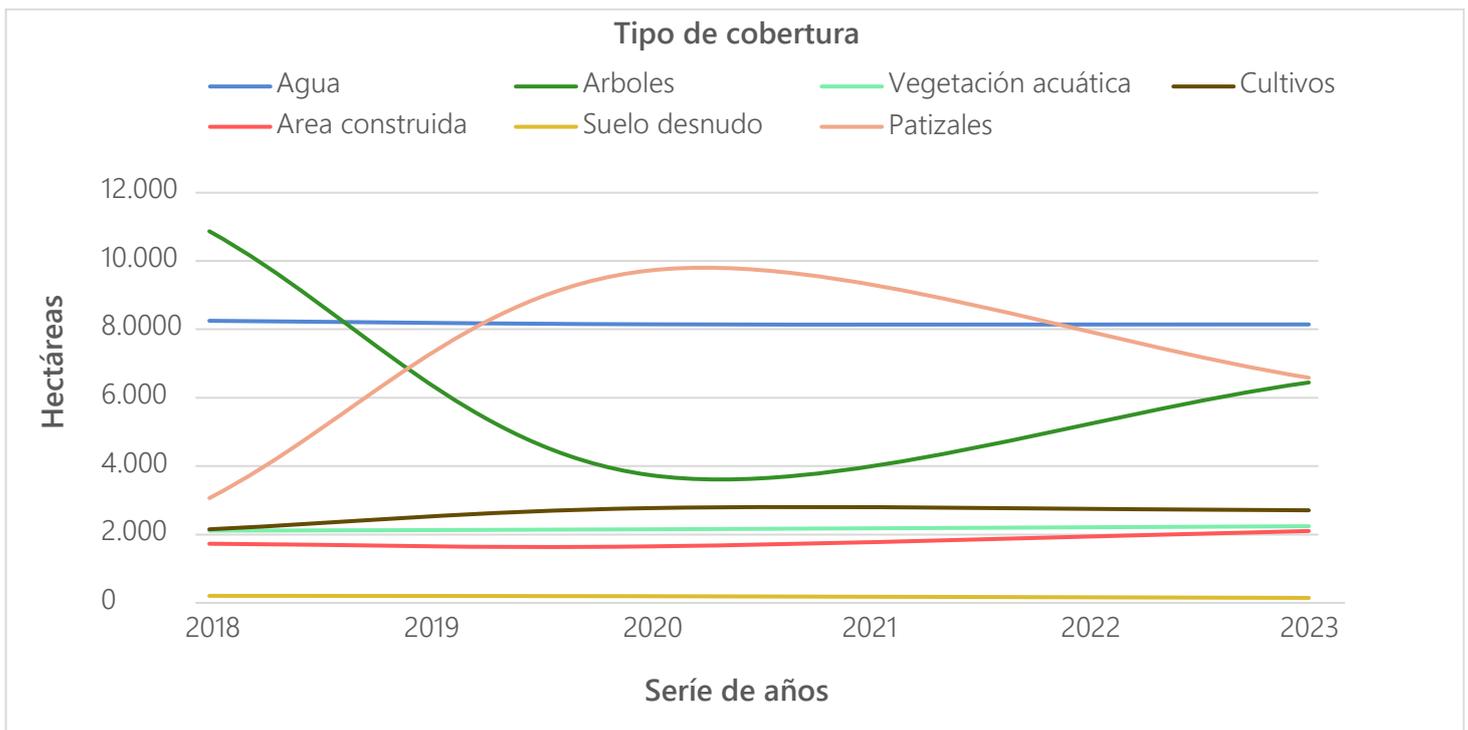


Principales cambios en la cobertura

- La cobertura del municipio de Ciénaga se compone principalmente de cultivos en la zona rural, con extensiones de hasta 82 mil metros cuadrados, evidenciando una mínima variación del 0.01% entre 2018 y 2023.
- En cuanto a la vegetación acuática, en 2018 abarcaba 108 mil metros cuadrados, experimentando una pérdida del 25% para 2020 y disminuyendo a 37 mil metros cuadrados. Sin embargo, se registró una recuperación progresiva, alcanzando los 64 mil metros cuadrados en 2023, lo que representa un incremento neto del 9.5%.
- Las áreas acuáticas, que en 2018 abarcaban 30 mil metros cuadrados, experimentaron un aumento significativo del 23% para 2020, llegando a 97 mil metros cuadrados, posiblemente relacionado con el fenómeno de La Niña y el consiguiente aumento de precipitaciones en ese año. No obstante, para 2023, se redujeron a 66 mil metros cuadrados, disminuyendo la extensión ganada en el año anterior al 11%.
- En cuanto a las áreas construídas, principalmente en centros urbanos, se registró una extensión de 17 mil metros cuadrados en 2018, con un leve incremento del 2% hacia 2023.

Entre 2018 y 2023, las áreas construídas o zonas urbana del municipio de Ciénaga tuvieron un notable aumento en las áreas periurbanas de la cabecera municipal, pasando de 17 mil metros cuadrados a 21 mil metros cuadrados, lo que representa una variación del 27%.

Tendencia de la cobertura de la tierra entre el 2018 y el 2023



12. Tomado de Impact Observatory, 2023. Esta fuente cuenta con análisis de coberturas desde el 2018 hasta la actualidad, por tal razón no se incluye desde el 2017, fecha inicial del análisis.

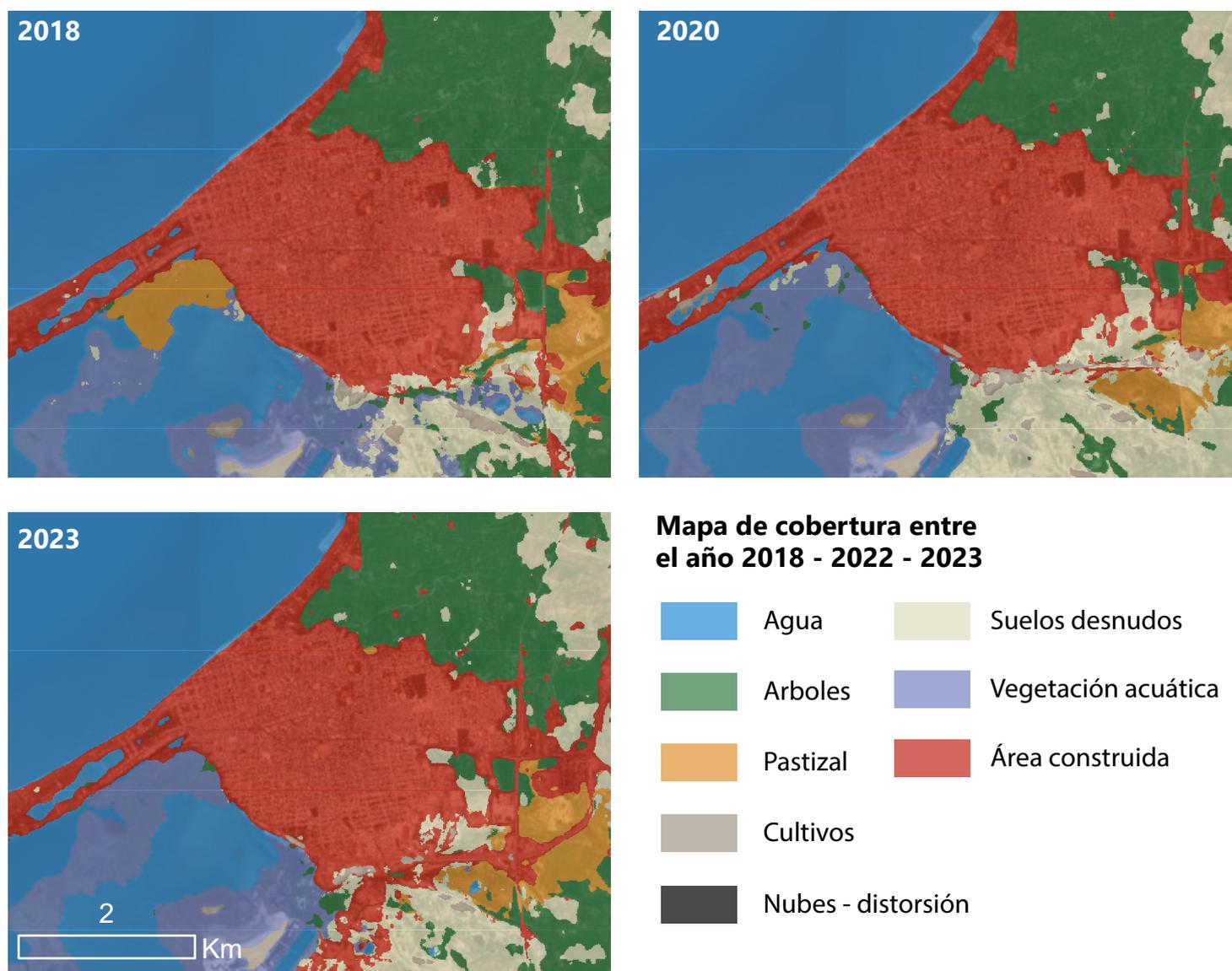


Entre los factores críticos se encuentra la transformación de áreas de aguas temporales en viviendas, lo que pone en riesgo a las poblaciones locales. En cuanto a la **cobertura de vegetación acuática**, se **observó un decrecimiento de 108 mil hectáreas de zonas que bordean el embalse Guajaro debido a la pérdida del espejo de agua, hasta 64 mil hectáreas**, lo que representa una **disminución del 72% del área ocupada por esta vegetación**. Esto sugiere una relación de pérdida no por aumento de superficie acuática, sino por el crecimiento de actividades de cultivo y de la cabecera urbana.

La **cobertura urbana** evidencia cambios significativos con un aumento **del 27%**, pasando de **16 mil a 21 mil hectáreas entre el 2018 y el 2023**. Las zonas de mayor crecimiento se encuentran ubicadas en el sur de la cabecera municipal y colindan con áreas que estaban destinadas a mitigar las inundaciones.

Se identificó que la cobertura de **área de pastizales** pasó de **21 mil hectáreas en 2018 a 27 mil hectáreas, un aumento del 29%** en el área destinada a actividades posiblemente relacionadas con la ganadería o el pastoreo de producción pecuaria. En cuanto al **área de cobertura de agua**, se **registró un aumento significativo del 200% en 2020**, alcanzando las 97 mil hectáreas debido al aumento de lluvias causadas por el fenómeno de La Niña. Sin embargo, esta **área disminuyó a 65 mil hectáreas en 2023**, lo que representa una **pérdida del 68% del área natural de máxima extensión de reservas hídricas** detectada tres años antes.

Mapa de cambio de cobertura entre los años 2018 - 2020 - 2023¹³



Elaboración de REACH - IMPACT, 2023.

13. Cobertura de la tierra, Corine land cover (Impact Observatory, 2023)



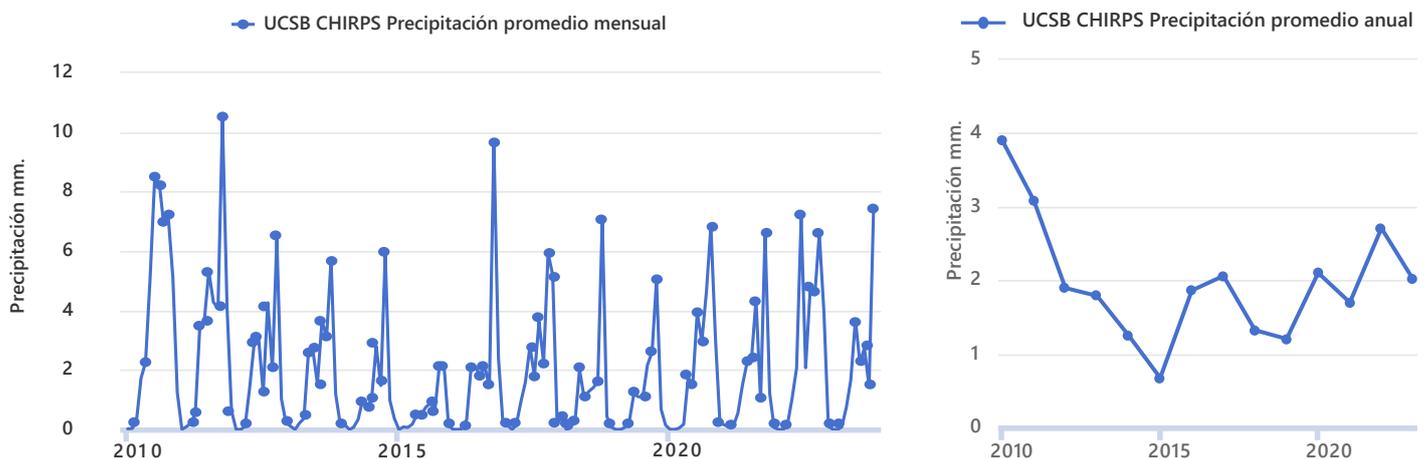
En Colombia, las transiciones climáticas entre periodos lluviosos y secos se caracterizan por la periodicidad y estabilidad entre los promedios de temperatura y precipitación en los mismos meses comparados con otros años, sin embargo, esta dinámica climática ha sufrido notables alteraciones. Se ha observado una disminución en la intensidad de las lluvias en algunos meses, seguida de precipitaciones más intensas en lapsos más cortos en ciclos subsiguientes.

Además, se ha identificado una correlación entre los picos de precipitación máxima y promedio, especialmente durante los años 2017 y 2023, considerados periodos críticos con lluvias intensas asociadas directamente a inundaciones en la cabecera municipal.

Es importante mencionar también la tendencia a una disminución en las precipitaciones en el municipio de Ciénaga, asociada al fenómeno del Niño. La gráfica de precipitación promedio anual muestra una caída hasta el año 2015, seguida de un aumento progresivo hasta el 2023, coincidiendo con la última inundación grave en el municipio. Estos cambios en los patrones climáticos plantean desafíos significativos y resaltan la necesidad de comprender y abordar los impactos locales de estas variaciones.

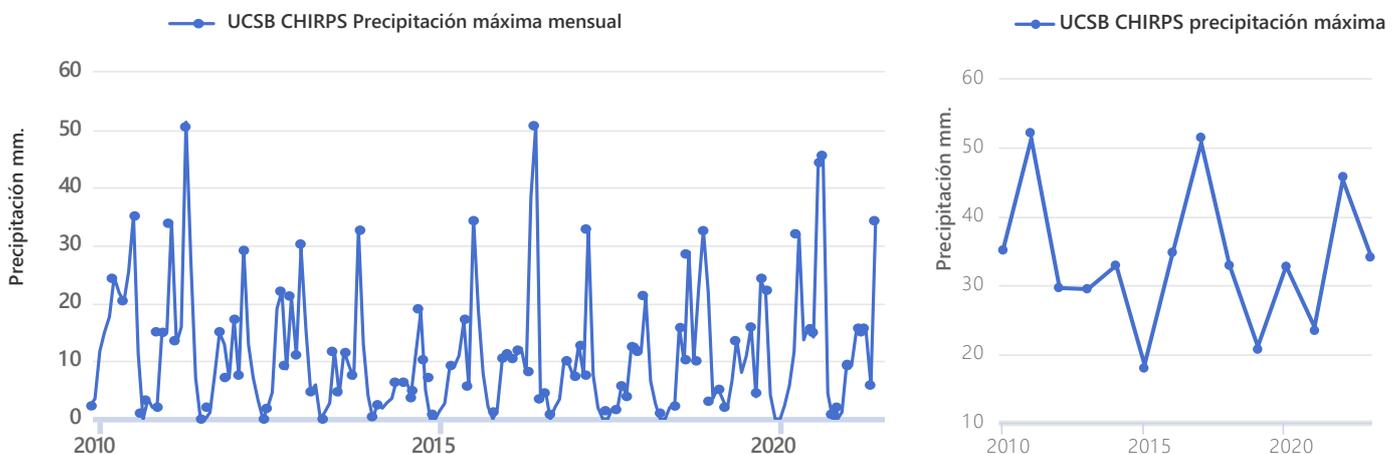
Gráficos de precipitación promedio anual y mensual desde el 2010 al 2023

Climate Hazards Center - CHIRPS (2023)¹⁴



Gráficos de precipitación máxima anual y mensual desde el 2010 al 2023

CHIRPS (2023)¹⁴



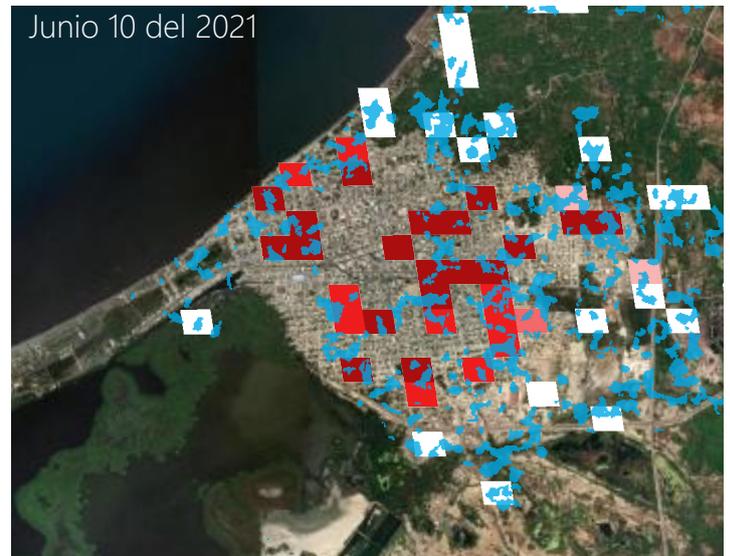
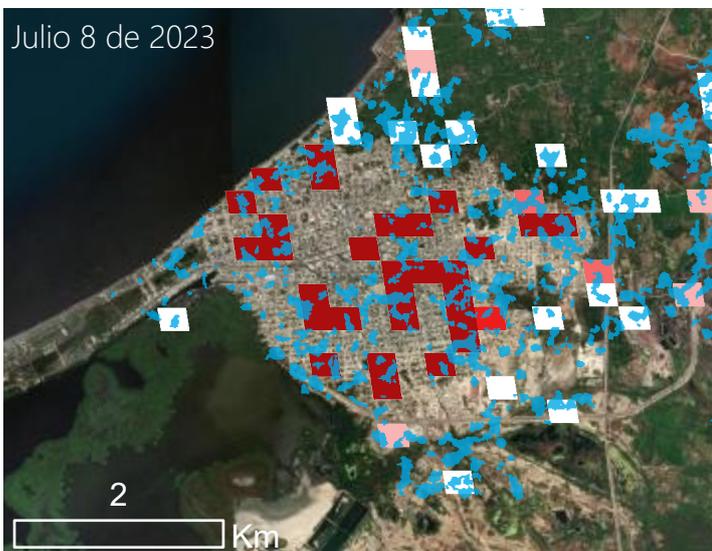
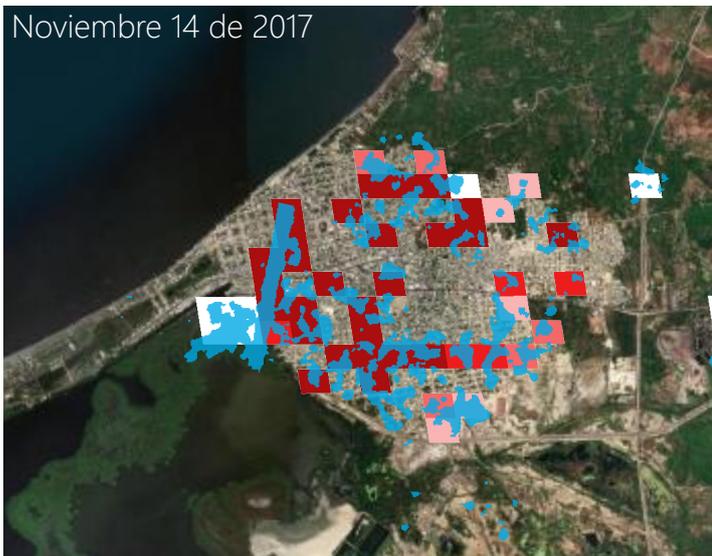
14. Tomado de CHIRPS, 2023.



Para analizar las inundaciones en el municipio de Ciénaga, nos enfocamos en tres fechas críticas: el 14 de noviembre de 2017, el 10 de junio de 2021 y el 8 de julio de 2023. Estas fechas se seleccionaron debido a que corresponden a los años con las mayores precipitaciones en los últimos siete años. A continuación, un análisis de las precipitaciones y sus efectos en cada una de las fechas mencionadas:

- **14 de noviembre de 2017:** Se observó una correlación con precipitaciones máximas mensuales de hasta 50 mililitros, con un promedio anual de hasta 10 mililitros. El modelamiento de inundaciones y la densidad poblacional de GHSL (2017) revelan que 42,460 personas fueron afectadas, abarcando aproximadamente 794 hectáreas, lo que representa el 70% del área urbana afectada.
- **10 de junio de 2021:** Aunque el promedio de precipitación anual en junio de 2021 se encuentra dentro del rango normal de 8 a 10 milímetros, se observa una relación evidente entre la precipitación máxima y la inundación. Durante este año, se registraron entre 45 y 48 milímetros de lluvia en un solo día de junio. Según el modelamiento rápido, se identificó que la población afectada fue de 23,210 personas, según GHSL (2021).
- **8 de julio de 2023:** Las precipitaciones máximas en julio de 2023 oscilaron entre 35 y 40 milímetros adicionales. Según el modelo rápido de inundación en el área urbana, se afectaron 140 hectáreas, con una población afectada de 25,938 personas.

Mapa modelamiento de inundaciones entre los años 2017 - 2020 - 2023



Mapa de modelamiento de inundación entre los años 2017, 2021 y 2023

Áreas propensas a inundación

Población expuesta

- Entre 1 y 20
- Entre 21 y 40
- Entre 41 y 80
- Entre 81 y 120
- Entre 121 y 160

Elaboración de REACH - IMPACT, 2023.



Puntos clave de la EBA de Ciénaga relacionada con afectaciones por inundaciones¹⁵

La mayoría de los hogares (83%) sufrió inundaciones en su vivienda o calles durante el último año, con un 48% enfrentando este problema entre 1 y 3 veces.

- El 62% reportó que las inundaciones afectan algunas calles y viviendas en el barrio, con una duración promedio de 1 a 3 días según el 37% de los encuestados.
- La percepción sobre la respuesta estatal y local ante las inundaciones es una preocupación destacada, con el 63% de los hogares reportó que no se está realizando acciones de mitigación desde el gobierno.
- El 90% reportó que las inundaciones generan afectaciones a la salud.

Proyección del modelamiento de inundación al 2040 (INVEMAR, 2011)

Para respaldar este análisis, se hizo referencia a un estudio de modelamiento de inundaciones proyectado hasta el año 2040, elaborado por INVEMAR¹⁴. Este estudio engloba diversos municipios en la costa caribeña de Colombia, incluyendo Ciénaga. Se encontró que más del 50% del área urbana de la cabecera municipal, con principal afectación sobre áreas de mayor densidad, están propensas a ser afectadas por inundaciones, como se detalla a continuación:

Mapa de modelamiento de inundación en Cienaga - Proyección al 2040¹⁶



15. Área profile EBA Ciénaga, 2023.

16. Tomado de INVEMAR, 2011.



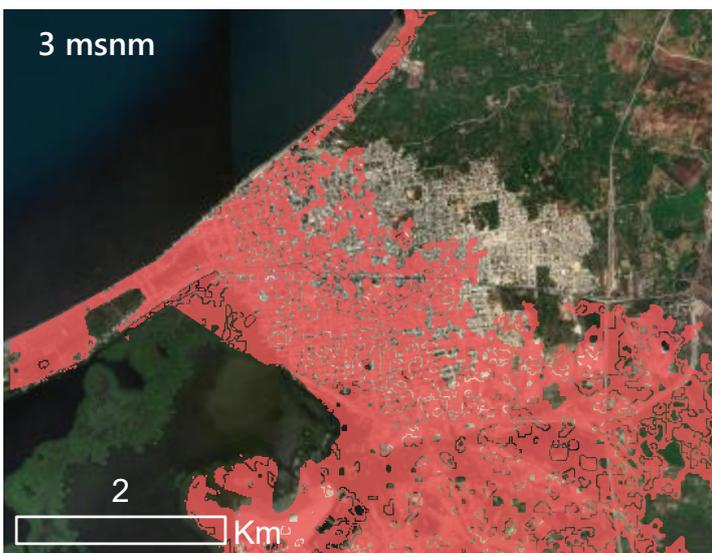
El análisis de modelamiento de inundaciones originadas por huracanes

Se basa en el cálculo de las elevaciones del nivel del mar utilizando el Modelo Digital de Elevación (DEM), se empleó el **DEM obtenido a partir de la fotografía satelital Sentinel 2 del año 2023**, caracterizado por su alta resolución. Mediante el uso del modelo cartográfico se identificaron las áreas de menor altitud en la topografía costera, **identificando puntos de filtración del agua en incrementos de 1, 2, 3 y 4 metros sobre el nivel del mar (msnm)**.

Esta metodología¹⁷ permitió la identificación de cuatro escenarios que representan una aproximación a los efectos de zonas afectadas por huracanes. En estos escenarios, se observa cómo la cabecera urbana de Ciénaga podría ser afectada por el incremento del nivel del mar provocado por huracanes. A continuación, se describen los escenarios:

- **En el primer escenario**, con un aumento de 1 msnm, se generan efectos de inundación en 70,000 metros cuadrados, lo que corresponde al 20% del área urbana, con afectaciones que superan el 30% de la población residente en este municipio.

Mapa de inundación por efectos de subida del nivel por huracanes



Elaboración de REACH - IMPACT, 2023.

17. Metodología elaborado por Balstrom, 2021.



- **El segundo escenario** contempla aumentos del nivel del mar de hasta 2 msnm, generando inundaciones en 80,000 metros cuadrados, aproximándose al 30% del área urbana construida, con afectaciones en un 38% de la población que habita la cabecera urbana. Cabe destacar que este escenario revela una infraestructura hidráulica deficiente y áreas urbanas situadas por debajo del nivel del mar, alcanzando hasta -2 metros.
- **Los tercer y cuarto** escenarios son especialmente preocupantes, ya que contemplan un aumento del nivel del mar de 3 y 4 msnm, respectivamente. Con 3 msnm, el 80% del municipio se sumiría en inundaciones, afectando un área urbana de 250,000 metros cuadrados, con aproximadamente el 85% de la población afectada. No obstante, es crucial resaltar que esta misma magnitud de afectación fue registrada en la última inundación. Finalmente, para el modelo de inundación de 4 msnm, se prevé una afectación de 304,000 metros cuadrados del área urbana.

Conclusión

En términos de conclusiones, se identifican factores que intensifican la vulnerabilidad y complican la mitigación de la amenaza. A continuación, se detallarán los factores susceptibles a intensificar las vulnerabilidades asociados al sitio geográfico ocupado por la población, seguido por la discusión de los elementos que amplifican las amenazas:

- La ocupación, ya sea legal o ilegal, de zonas geográficas designadas como áreas de mitigación para inundaciones históricas, junto con el escaso control y gestión de estos espacios, así como la falta de planificación, impiden la mejora de las condiciones de vida de las poblaciones que residen en estas áreas.
- La planificación urbana insuficiente del crecimiento de la cabecera urbana, especialmente en relación con la gestión de las aguas de la Ciénaga Grande de Santa Marta —zona receptora de aguas residuales y de otros municipios durante períodos de alta precipitación, relacionado con un sistema hidráulico de aguas insuficiente de acuerdo con resultados de la Evaluación Basada en Área de Ciénaga.
- La construcción de infraestructura vial sin estudios adecuados agrava la descarga de aguas residuales, concentrando los polos de desarrollo urbano en zonas más propensas a inundaciones, de acuerdo con información de la alcaldía de Ciénaga.
- De acuerdo con INVEMAR¹⁸, se ha identificado un alto nivel de coliformes y depósitos de aguas contaminadas en la región del Caribe, afectando tanto la actividad económica como la salud de la población local.
- La planificación en torno al cambio climático, la erosión costera y el probable aumento del nivel del mar es inexistente, limitando los esfuerzos a la recuperación temporal de la línea costera mediante infraestructuras como espolones para mantener la amplitud de la playa. Este enfoque, aunque funcional a corto plazo, no aborda de manera efectiva los desafíos a largo plazo asociados con el cambio climático y sus consecuencias en la región.

18. Diagnóstico y Evaluación de la Calidad de las Aguas Marinas y Costeras del Caribe y Pacífico Colombianos. Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia (REDCAM). Informe técnico 2014

Acerca de REACH

La Iniciativa REACH facilita el desarrollo de herramientas y productos de información que mejoran la capacidad de los actores de la ayuda para tomar decisiones basadas en pruebas en contextos de emergencia, recuperación y desarrollo. Las metodologías utilizadas por REACH incluyen la recopilación de datos primarios y el análisis en profundidad, y todas las actividades se llevan a cabo a través de mecanismos de coordinación de la ayuda interinstitucional. REACH es una iniciativa conjunta de IMPACT Initiatives, ACTED y el Instituto de las Naciones Unidas para la Formación y la Investigación - Programa Operacional para las Aplicaciones Satelitales (UNITAR-UNOSAT).



Ayuda Humanitaria
y Protección Civil



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Embajada de Suiza en Venezuela