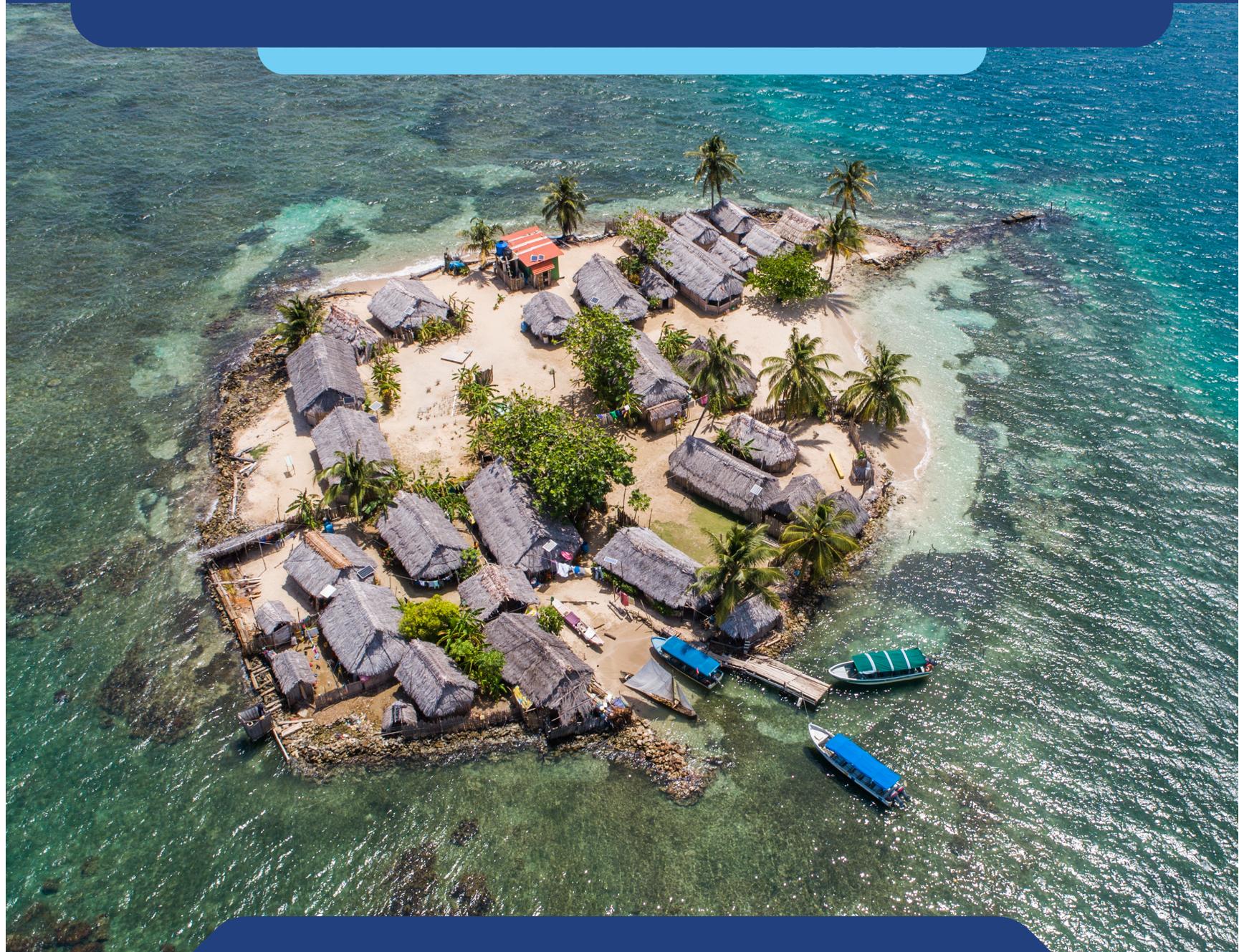
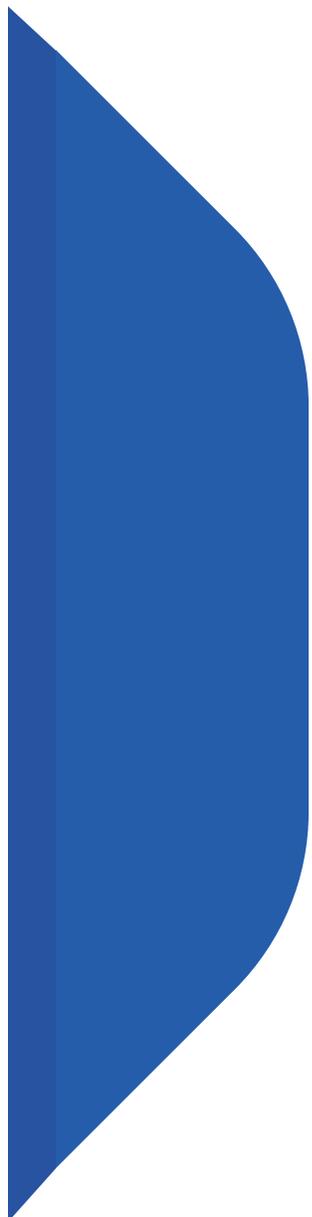


MINISTERIO DE
AMBIENTE

GUÍA DE REFINAMIENTO DE ÁREAS PILOTOS EN REFERENCIA A RESULTADOS DE ESTUDIO DE ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR AL 2050

VS1.0 MARZO 2024





**GUÍA DE REFINAMIENTO
DE ÁREAS PILOTOS EN
REFERENCIA A RESULTADOS
DE ESTUDIO DE ASCENSO DEL
NIVEL DEL MAR AL 2050**

VS1.0 MARZO 2024

Ministerio de Ambiente
Dirección de Cambio Climático
Departamento de Adaptación y Resiliencia

Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN.	9
2	CONTENIDO.	10
2.1	Primera fase del Preproceso.	11
2.1.1	Configuración de Software.	11
2.1.2	Creación de la topo batimetría.	13
2.1.3	Selección de escenarios en la zona de estudio.	16
2.2	Segunda Fase: análisis y generación de mapas de inundación.	18
2.2.1	Carga de ficheros.	18
2.2.2	Creación de carpetas para los resultados.	19
2.2.3	Modificación de la simbología.	19
2.2.4	Interpolación bajo el método IDW.	20
2.2.5	Análisis de píxeles inundados en tierra.	21
2.2.6	Selección de píxeles positivos para inundación.	22
2.2.7	Ráster binario para la identificación de píxeles inundados.	23
2.2.8	Análisis de conectividad mediante la herramienta Clump.	23
2.2.9	Selección de la mancha conectada con el mar.	25
2.2.10	Aplicación de la herramienta r.null.	26
2.2.11	Aplicación de la herramienta clip o cortar ráster por capa de máscara.	27
2.2.12	Aplicación de la herramienta r.mask.rast.	29
1.15.	Comprobación de los resultados.	30
3	Conclusión.	34



Tabla de Ilustraciones

Figura 1. Panel de herramientas	11
Figura 2. Crear polígono de la zona de estudio	12
Figura 3. Creación del polígono cuadrado perfecto	12
Figura 4. Identificación de la zona de estudio	13
Figura 5. Corte del MDT para la zona de estudio	13
Figura 6. Creación de la BATICONSTANTE	14
Figura 7. Combinación de BATICONSTANTE – MDT de la zona de estudio	15
Figura 8. Topo batimetría	15
Figura 9. Carga del fichero del Nivel de Agua Total a trabajar	16
Figura 10. Selección del fichero NAT a analizar	17
Figura 11. Extracción de los puntos NAT	17
Figura 12. Visualización de la ventana de QGIS con las 3 capas cargadas, habiendo cambiado la paleta de colores	18
Figura 13. Conexión de carpeta a guardar el proyecto	19
Figura 14. Cambio de color a la topo batimetría para mejor visualización	19
Figura 15. Aplicación de la herramienta interpolación IDW	20
Figura 16. Cálculo la resta del ráster obtenido con la herramienta IDW menos el DEM	21
Figura 17. Valores positivos inundados	21
Figura 18. Selección de los píxeles con valores positivos	22
Figura 19. Ráster con valores positivos	22
Figura 20. Aplicación de la herramienta r.null para eliminar valores 0	23
Figura 21. Ráster con valores positivos (píxeles inundados)	23
Figura 22. Relación de la conectividad física entre píxeles inundados	24

Figura 23. Ráster con las manchas de inundación en tierra conectadas al mar	24
Figura 24. Pinchar sobre la mancha conectada con el mar para conocer su valor (150) en este caso	25
Figura 25. Se crea ráster binario con 1 = píxeles conectados al mar y 0 = no conectados con el mar	26
Figura 26. Ráster correspondiente a la inundación	26
Figura 27. Extracción del polígono de la línea de costa	27
Figura 28. Guardar la extracción de la línea de costa	28
Figura 29. Mancha de inundación para el corregimiento de Juan Díaz, distrito de Panamá	28
Figura 30. Cálculo y resultado del calado de inundación	29
Figura 31. Comprobación de los resultados obtenidos, utilizando las capas de topobati.tif, NAT_idw y Calado de inundación	30
Figura 32. Mapa del Calado o Cota de Inundación para el corregimiento de Juan Díaz, distrito de Panamá, provincia de Panamá, República de Panamá. 2023. Proyección ssp585	31

Lista de Abreviaturas

NAT: Nivel de Agua Total.

MDT: Modelo Digital del Terreno.

QGIS: Quantum Geographic Information System.

GDB: Geodatabse.

SSP: Shared Socioeconomic Pathways” o “Caminos Compartidos de Desarrollo Socioeconómico.

SHAPEFILE: formato de archivo ampliamente utilizado en SIG para almacenar datos geoespaciales, como puntos, líneas y polígonos.

IDW: Inverse Distance Weighting - método de interpolación.

IGNTG: Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia.

1. Introducción

El cambio climático está provocando que nuestro océano se caliente y los glaciares se derritan, lo que resulta en el aumento del nivel del mar. De media, los niveles del mar han subido unos 23 centímetros desde 1880, y casi la mitad de esos centímetros han aumentado en los últimos 25 años. Cada año, el mar sube otros 3,4 milímetros. La costa panameña tiene una extensión alrededor de 3000 km, de los cuales 1700 km corresponden al litoral Pacífico y 1288 km al litoral caribeño. La costa del Pacífico panameño es irregular, con una plataforma continental amplia (200 m de profundidad promedio) y con un declive gradual (Ministerio de Ambiente, 2022).

Por lo antes señalado, el Ministerio de Ambiente a través de la Dirección de Cambio Climático, presenta los resultados de la generación de un Base de Datos de Dinámicas Marinas en las Costas Panameñas con una proyección al 2050, este estudio tiene como objetivo aumentar la resiliencia presente y futuras de las zonas costeras de Panamá frente a eventos extremos y al cambio climático, concretamente ante el aumento del nivel del mar.

Este estudio se generó a partir de información oficial histórica reconstruida mediante nuevas bases de datos de oleaje y nivel del mar, y para escenarios futuros de subida del nivel medio del mar debido al cambio climático. El estudio de dinámicas marinas, fue realizado sobre las costas panameñas tanto Caribe como Pacífico, para obtener a una proyección al 2050 de cuanto estaría aumentando el mar en nuestras costas y poder evaluar la vulnerabilidad y los impactos del cambio climático asociados al ascenso del nivel del mar.

Los resultados del estudio muestran que el 2.01% de superficie total del país tiene la posibilidad de presentar inundación costera al 2050. Se contabiliza un impacto en zonas pobladas del 0.2%, proyectos de acuicultura y salineras de 0.14%, afloramiento

rocoso y tierra desnuda, área heterogénea de producción agropecuaria, arroz, bosque latifoliado mixto maduro, bosque latifoliado mixto secundario, bosque plantado de coníferas, bosque plantado de latifoliadas, caña de azúcar, explotación minera, maíz, otro cultivo anual, otro cultivo permanente, palma aceitera, pasto, plátano/banano, playa y arenal natural, rastrojo y vegetación arbustiva, vegetación herbácea un 0.61¹.

Al finalizar el estudio se realizó un proceso de transferencia de conocimientos de parte del equipo de especialistas del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, España, donde presentaron el método bathtub o método de la bañera, el cual consiste en analizar la mancha de inundación en una zona costera específica del país con el objetivo de obtener información más detallada a nivel local sobre el impacto por ascenso del nivel del mar.

En esta línea, se considera oportuno generar mapas de inundación a consecuencia del aumento del nivel del mar bajo los escenarios de cambio climático a escala local (provincias, distritos, corregimientos), utilizando el modelo de elevación digital del terreno oficial del país generado por el Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia" y puntos costeros del nivel de agua total por cada escenario que se analice. En este sentido, se procede a realizar el ejercicio de análisis poniendo en práctica el método bathtub para el corregimiento de Juan Díaz. Para esta prueba, se debe tener como insumos principales la siguiente información:

- Línea de costa (IGNTG).
- Capa del nivel de agua total (Módulo de Vulnerabilidad y Riesgo Climático – Plataforma Nacional de Transparencia Climática - MiAmbiente).
- Un modelo digital del terreno (IGNTG).

¹Fuente: Dirección de Información Ambiental – Dirección de Cambio Climático, Ministerio de Ambiente.

2. Contenido

Una de las amenazas más significativas para los sistemas costeros y las áreas de baja altitud se relaciona con los eventos de inundación provocados por el cambio climático, en particular aquellos que están vinculados al aumento del nivel del mar.

Teniendo en cuenta la gama amplia de modelos que resuelven el fenómeno de inundación en tierra con diferente grado de aproximación y, por tanto, de esfuerzo computacional. La inundación costera comúnmente se estudia mediante técnicas espaciales basadas en Sistemas de Información Geográfica (GIS), entre los que destaca el modelo "bathtub", BTM (o método bañera). Éste es un modelo sencillo y muy eficiente desde el punto de vista computacional.

En este modelo, la inundación se obtiene mediante la intersección de la cota que alcanza el nivel del mar (originado por diferentes dinámicas) con el MDT. Con este método, el volumen de agua que entra en el dominio es infinito y todo el terreno por debajo de un determinado nivel, físicamente conectado entre sí y con el mar, queda inundado. Por tanto, como datos

de entrada, este modelo sólo requiere información sobre (1) el modelo digital del terreno y sobre (2) el nivel del agua total cerca de costa a lo largo de todo el litoral.

Esta guía para aplicar la metodología BATHTUB en procesos de inundación en áreas de estudio, utilizando el programa QGIS que es un Sistema de Información Geográfica profesional de fácil uso, de acceso gratuito y de código abierto, que posibilita la creación, visualización, análisis, edición y publicación de información geoespacial.

El método "bathtub" consiste en inundar las celdas bajo el nivel de agua, si están conectadas entre sí por cualquiera de las 8 direcciones posibles (cuatro laterales y diagonales, a través de los vértices). Se trata de una forma sencilla de abordar la inundación y solo requiere herramientas de GIS ("Geographic Information System") y un modelo digital del terreno sobre el que calcular la extensión y profundidad de la mancha de agua.

2.1. Primera fase del Preproceso

2.1.1. Configuración de Software

Antes de iniciar con el proceso es importante configurar el programa de la siguiente manera: Establecer el sistema de coordenadas a WGS 84/UTM Zone 17N, luego en la ventana de herramientas se debe ajustar las herramientas que serán utilizadas. Se da click derecho y se selecciona las opciones que se muestran en la figura 1.



Figura 1. Panel de herramientas.

Antes de seguir al paso de crear la topo batimetría es necesario primero generar un polígono cuadrado perfecto para extraer el ráster correspondiente a nuestra zona de estudio y para ello se sigue los siguientes pasos:

Creamos el polígono con la herramienta **Crear Nueva Capa de Archivo vectorial (Shapefile)**:

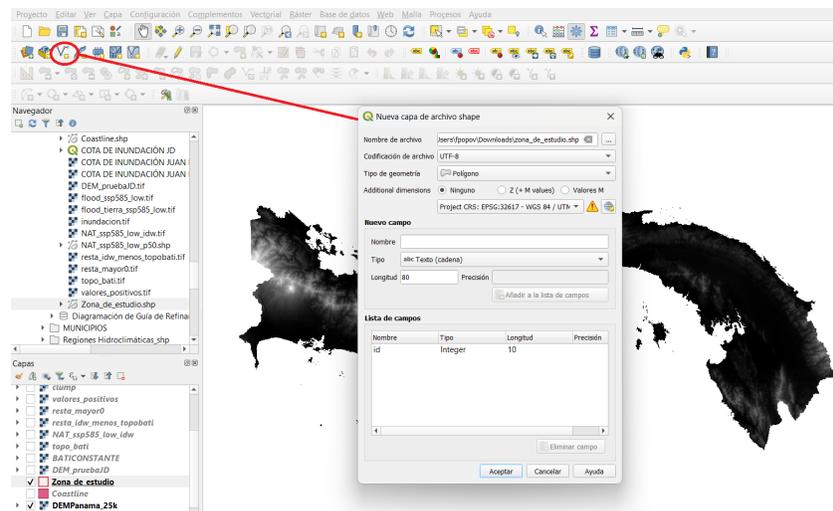


Figura 2. Crear polígono de la zona de estudio.

Una vez creado el polígono de la zona de estudio, se procede a dibujar el cuadrado perfecto en la zona de interés, luego se hace click derecho sobre el archivo creado y seleccionamos **Conmutar Edición**, en seguida se selecciona la herramienta **Añadir Polígono**. Luego se abre otro grupo de herramientas donde se debe seleccionar **Rectángulo a Partir de un Centro y Punto**.

Finalmente, se crea el polígono en el área de estudio y se continua con los pasos descrito en el siguiente apartado.

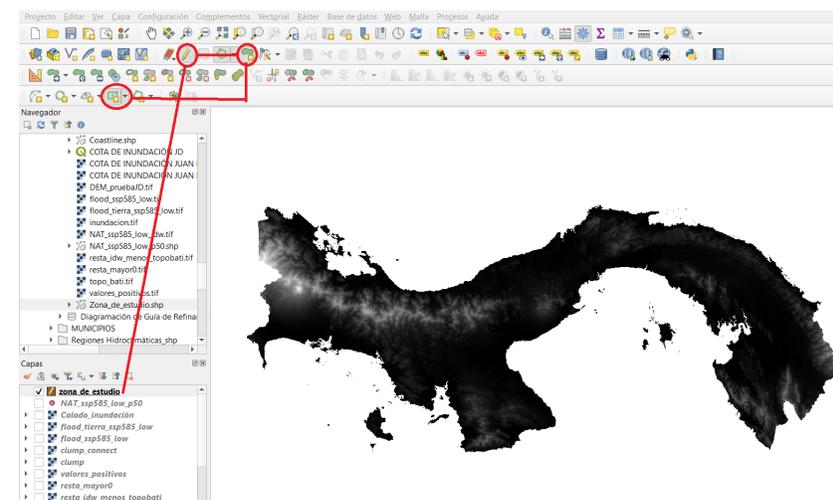


Figura 3. Creación del polígono cuadrado perfecto.

2.1.2. Creación de la topo batimetría

En este primer paso, nuestro punto de partida es el MDT de 5 m de resolución horizontal facilitado por el IGNTG => MDT_Panama25k. Este **MDT_Panama25k** debe recortarse por un polígono, formato shapefile, que represente la zona de estudio. Este polígono debe tener el mismo sistema de coordenadas que el MDT: **WGS84 UTM17N**.

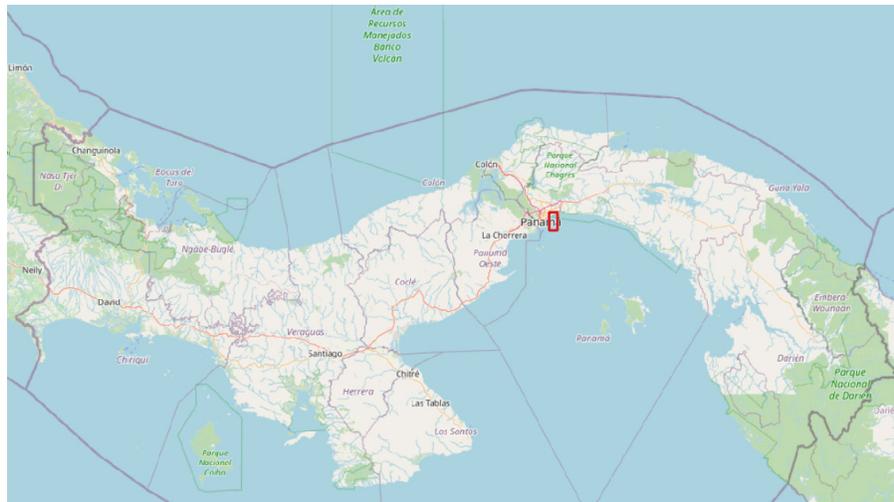


Figura 4. Identificación de la zona de estudio.

Para recortar el MDT para el polígono de la zona de estudio utilizamos la herramienta Clip Ráster by Mask Layer, tal como muestra la figura. En el parámetro extent debemos seleccionar el extent del polígono de la zona de estudio.

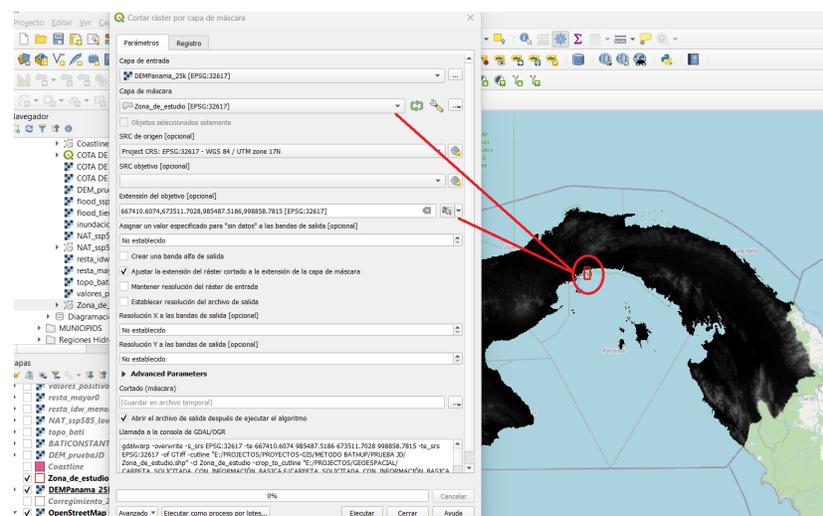


Figura 5. Corte del MDT para la zona de estudio.

Una vez extraído nuestro MDT para la zona de estudio, se procede a crear la “batimetría” constante con valor -5. Para ello creamos un ráster con la herramienta **Create constant layer** con los parámetros que aparecen en la figura: mismo extent que el polígono que hemos utilizado como “máscara” para la extracción anterior, tamaño de celda de salida el mismo que el del MDT (5metros) y valor constante del ráster -5.

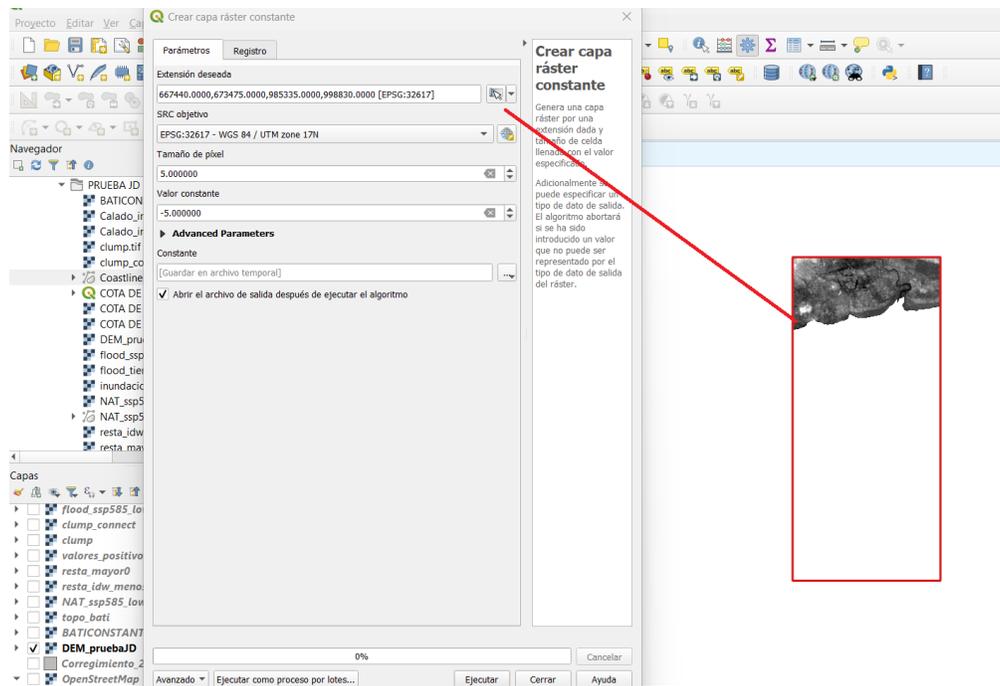


Figura 6. Creación de la BATICONSTANTE

Una vez obtenida la batimetría constante con valor -5 debemos acoplar este ráster a nuestro MDT.

Para ello utilizamos la herramienta ráster llamada **Merge**. Ya que ambos ráster solapan en tierra, debemos dar prioridad a los píxeles procedentes del MDT en la zona tierra. Para ello, en el parámetro Input Layers de la herramienta Merge, debemos seleccionar las capas que queremos crearles un mosaico y **debemos darle un orden de prioridad**. El MDT tiene prioridad en caso de solape de píxeles, por lo que debe estar por debajo de la baticonstante en el listado chequeado, tal como aparece en la segunda imagen adjunta (puede mover el orden del listado con el mouse si este sale en orden inverso). El resto de los parámetros de la herramienta deben dejarse como están. Solo se le otorga un nombre de salida al mosaico que hemos creado. El resultado es una topo batimetría con los mismos valores en tierra que nuestro MDT original, pero con valores en agua constantes, -5.

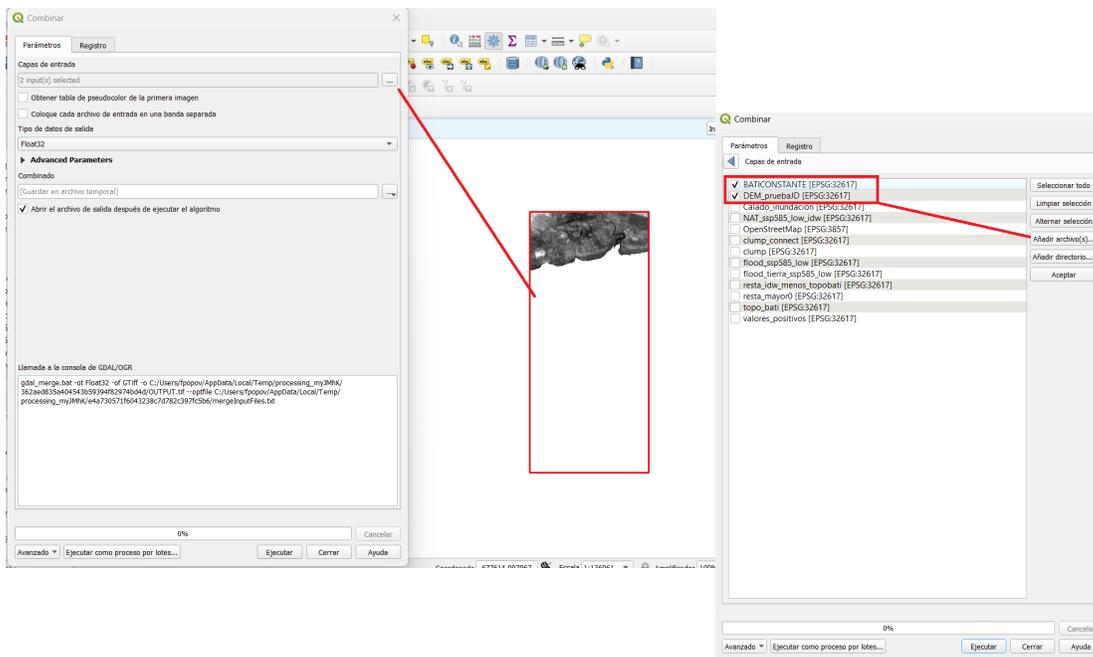


Figura 7. Combinación de BATICONSTANTE – MDT de la zona de estudio.

El resultado es una **topo batimetría** con los mismos valores en tierra que nuestro MDT original, pero con valores constantes en agua, -5.

Esta topo batimetría junto a los puntos de **nivel de agua total** (NAT) de la zona de estudio serán los insumos necesarios para el cálculo de inundación en la zona deseada.

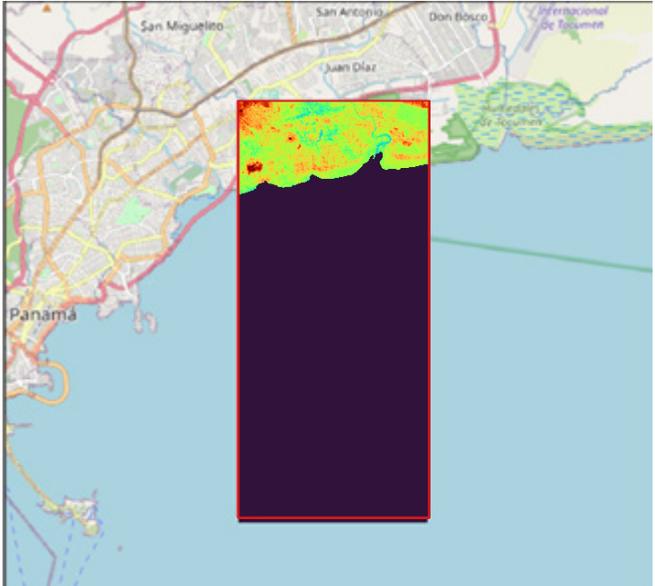


Figura 8. Topo batimetría.

2.1.3. Selección de escenarios en la zona de estudio

En este paso, se cargan los escenarios de NAT que se desea procesar en la zona de estudio.

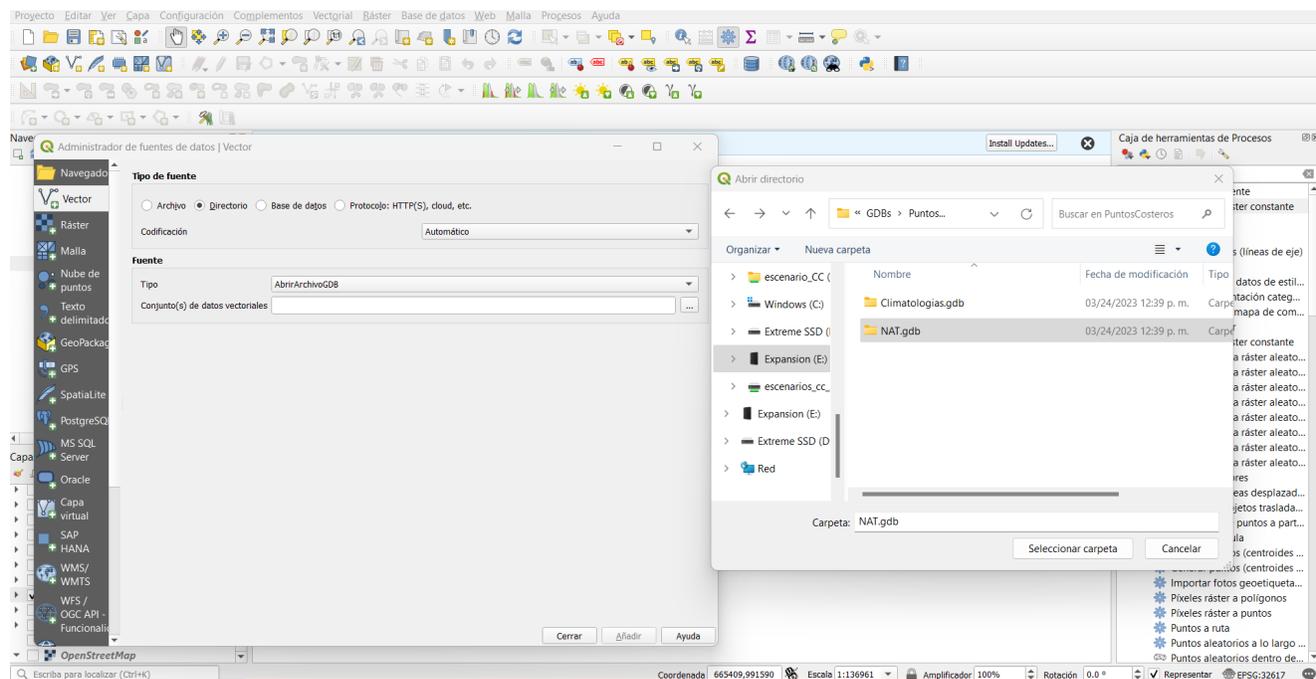


Figura 9. Carga del fichero del Nivel de Agua Total a trabajar.

Se selecciona el escenario de NAT que interesa analizar:

- Permanente o asociado a eventos extremos,
- El escenario climático SSP2-4.5 o SSP5-8.5,
- Confianza de los datos media o baja y
- El percentil del 5%, 50% o 95%.

En el caso de NAT asociado a eventos extremos, se tendrá que elegir:

- El período de retorno asociado a los datos que se quiere analizar.

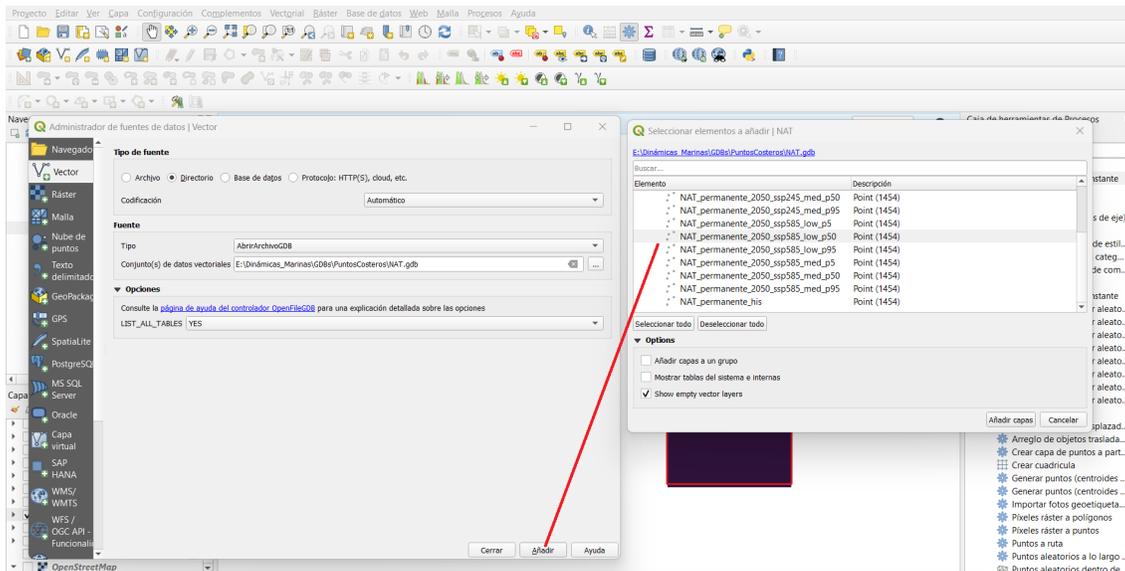


Figura 10. Selección del fichero NAT a analizar.

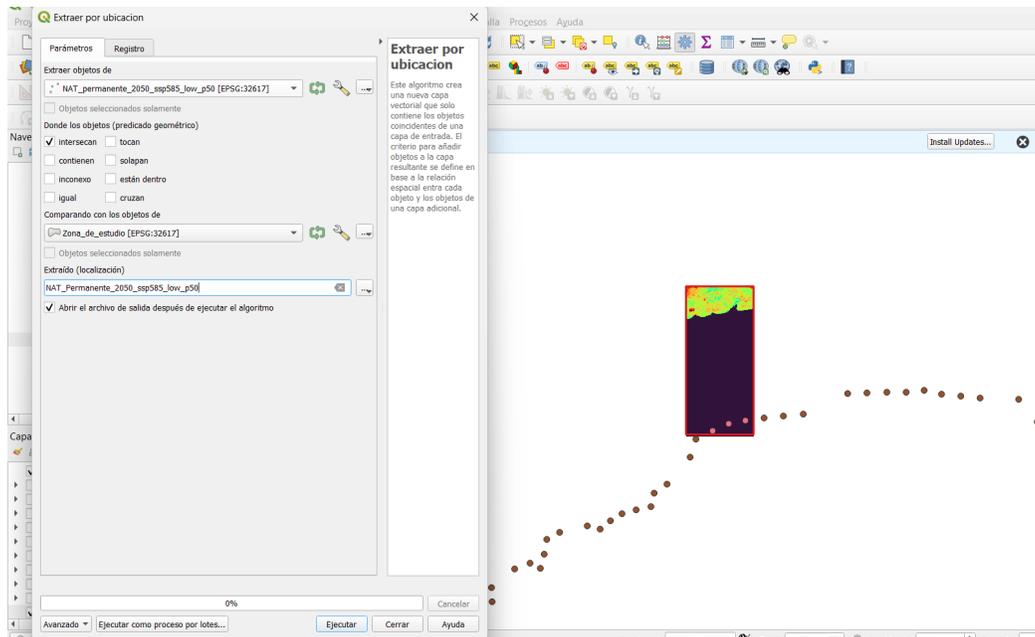


Figura 11. Extracción de los puntos NAT.

2.2. Segunda Fase: análisis y generación de mapas de inundación

Cabe destacar, que los pasos a seguir en este caso práctico son realizados con los ficheros mencionados anteriormente, sin embargo, el procedimiento es igual para otras zonas de estudios.

Para realizar estos análisis es necesario contar con un MDT de zona objetivo y los puntos costeros de nivel de agua total para los escenarios analizados. Además, se debe tener el software QGIS, polígono de la línea de costa y los shapefile con los valores de nivel de agua total (NAT) a lo largo de la costa para el escenario a estudiar y su respectivo percentil y nivel de confianza como se mencionó anteriormente.

2.2.1. Carga de ficheros

- Shapefile: NAT_permanente_2050_ssp585_low_p50.shp
- Línea de costa: Coastline
- MDT: mdt_bati.tif o topobati.tif (este es el MDT del resultado del punto 1.1. creando la topo batimetría realizado en la primera fase).

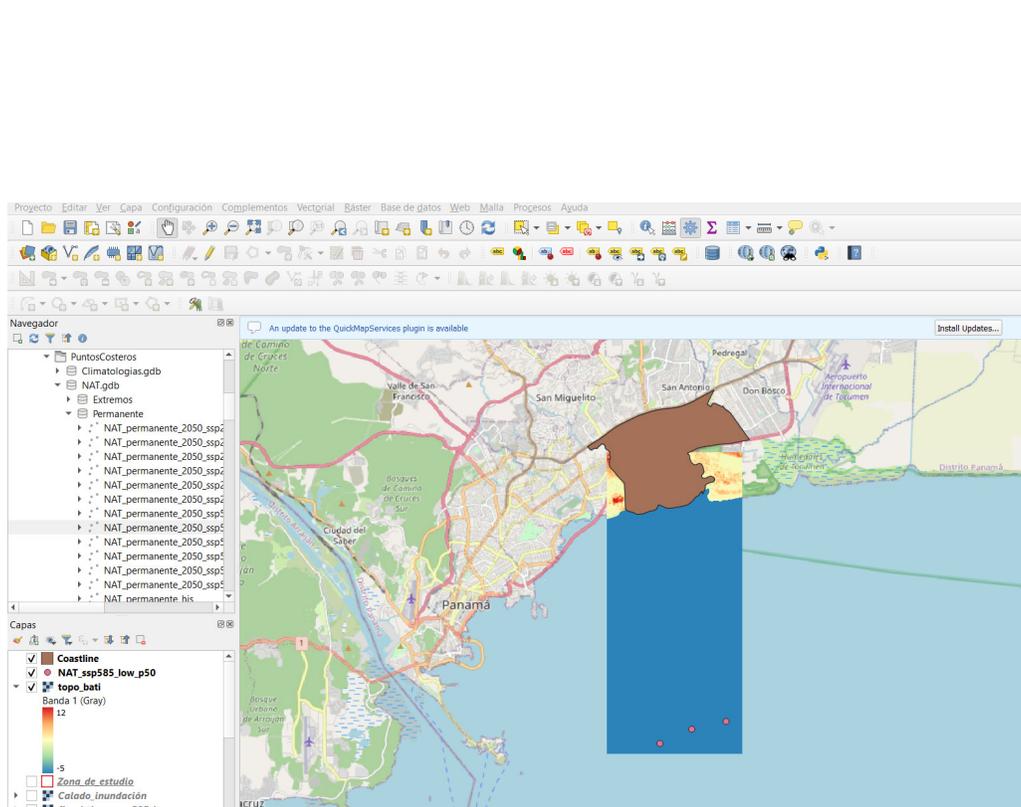


Figura 12. Visualización de la ventana de QGIS con las 3 capas cargadas, habiendo cambiado la paleta de colores.

2.2.2. Creación de carpetas para los resultados

En este primer paso, nuestro punto de partida es el MDT de 5 m de resolución horizontal que nos facilitaron desde el IGNTG => MDT.



Figura 13. Conexión de carpeta a guardar el proyecto.

2.2.3. Modificación de la simbología

Una vez cargadas las capas en el programa se procede realizar los siguientes pasos para aplicar el análisis.

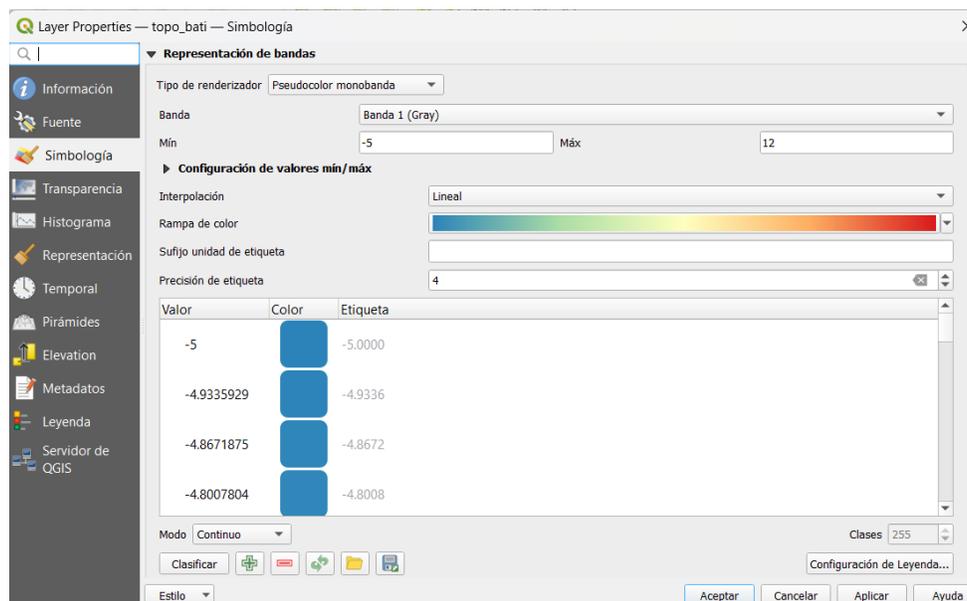
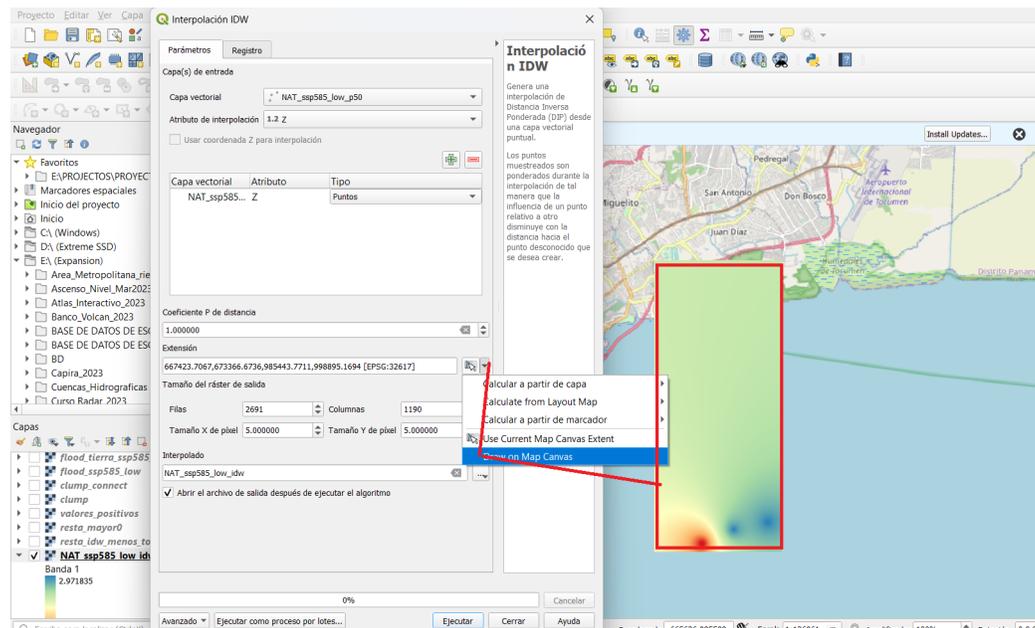


Figura 14. Cambio de color a la topo batimetría para mejor visualización.

2.2.4. Interpolación bajo el método IDW

La técnica de Interpolación por Distancia Inversa Ponderada (IDW, por sus siglas en inglés) se emplea para generar una superficie continua a partir de un conjunto discreto de puntos de muestreo conocidos como niveles de agua total (NAT). Este método asigna valores a los puntos de interés basándose en la ponderación de los valores conocidos más cercanos, donde la influencia de cada punto disminuye conforme aumenta la distancia.



Se selecciona un rectángulo que cubra la zona común a ambas capas (va a ser nuestra zona objetivo).

Figura 15. Aplicación de la herramienta interpolación IDW.

Nota: El resultado del IDW son los valores del NAT que se han interpolado tierra adentro. El tamaño de pixel se debe colocar 5, ya que corresponde al original del MDT.

2.2.5. Análisis de píxeles inundados en tierra

En este punto se resta el resultado obtenido de la interpolación con IDW menos la topo batimetría, a fin de determinar aquellos píxeles cuyo nivel de agua total supera el (MDT) (es decir, píxeles que se inundan).

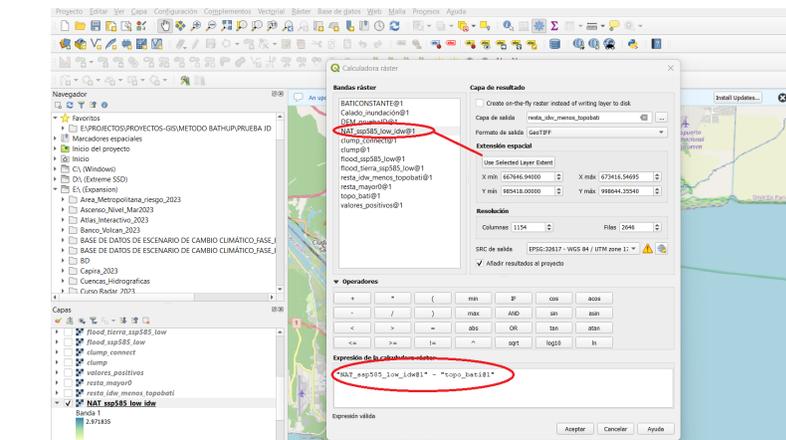


Figura 16. Valores positivos inundados.

Nota: En ese paso es importante seleccionar para la extensión espacial el archivo interpolado en el paso anterior, en este caso **NAT_ssp585_low_p50**.

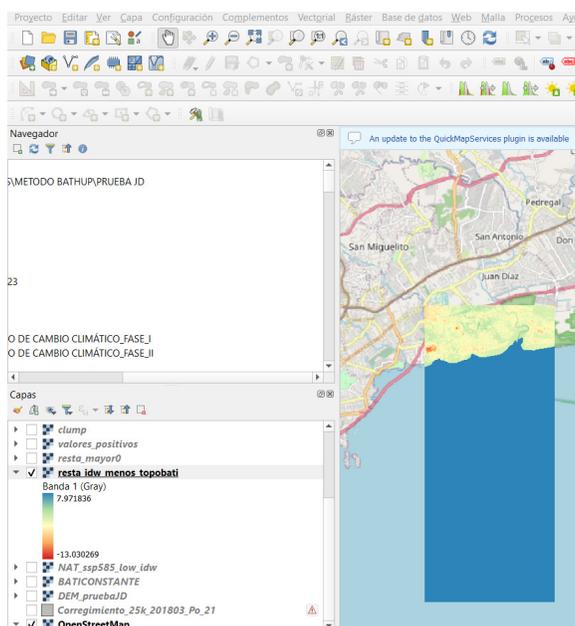


Figura 17. Ráster con valores positivos.

Nota: El resultado es la resta de los valores positivos que quedan inundados, los valores negativos no.

2.2.6. Selección de píxeles positivos para inundación

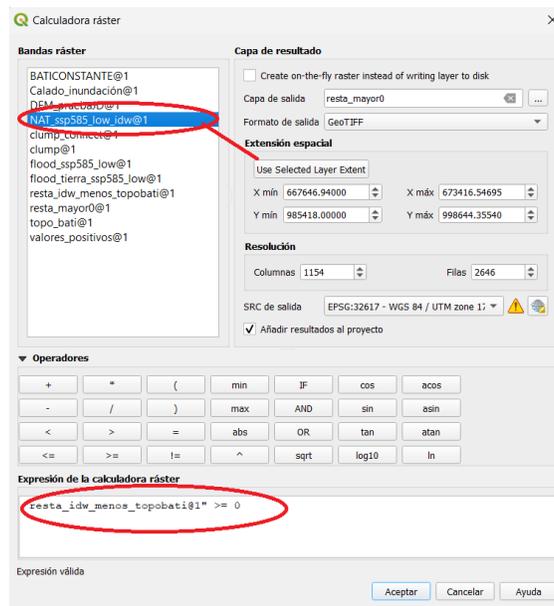


Figura 18. Selección de los píxeles con valores positivos.

Nota: El resultado es un ráster con valores en binario 0 (valores de la resta negativos) y 1 (valores positivos).

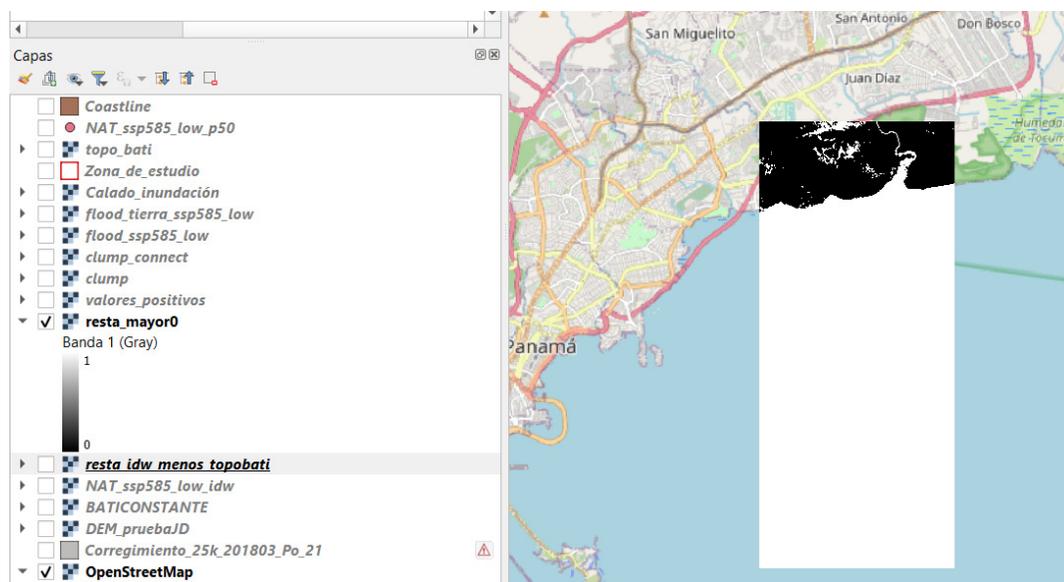


Figura 19. Ráster con valores positivos.

2.2.7. Ráster binario para la identificación de píxeles inundados

Luego se aplica la herramienta null para quitar los valores "0" del ráster binario. Es decir, para quedarnos únicamente con los píxeles inundados.

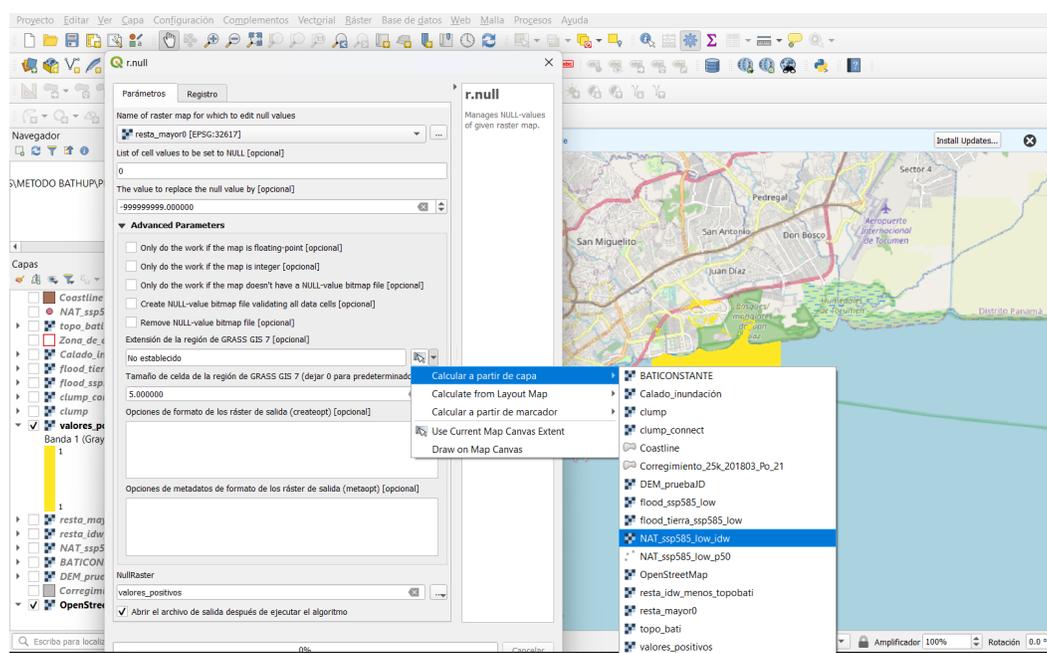


Figura 20. Aplicación de la herramienta r.null para eliminar valores 0.

Nota: Con esta herramienta r.null se eliminan los ceros del ráster creado en el paso anterior y como resultado se obtiene un ráster solo con los píxeles inundados.

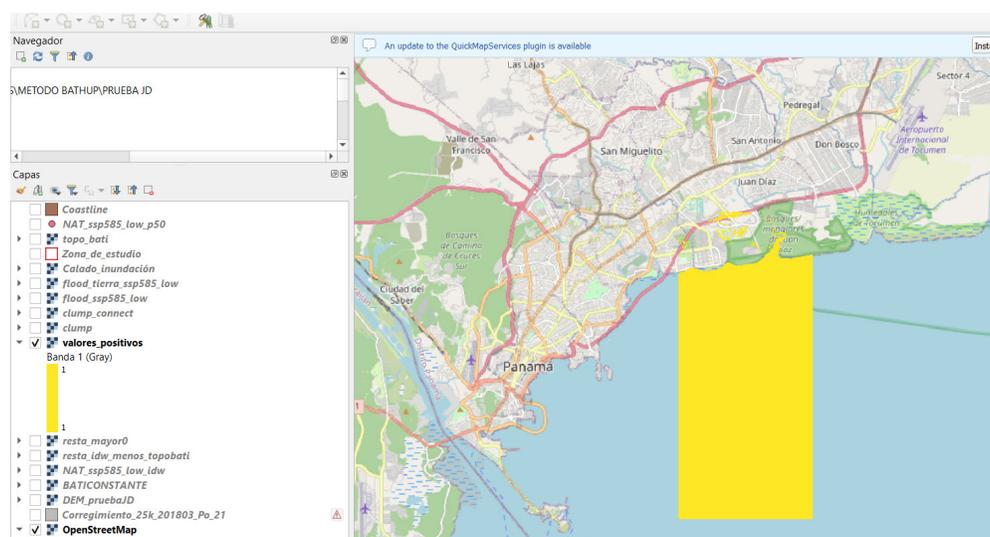


Figura 21. Ráster con valores positivos (píxeles inundados).

2.2.8. Análisis de conectividad mediante la herramienta Clump

Una vez se tiene los valores positivos, se procede a aplicar la herramienta Clump para determinar la conectividad hidráulica o física entre los píxeles. Con esto se busca detectar píxeles inundados aislados, es decir, no conectados con el mar para eliminarlos posteriormente

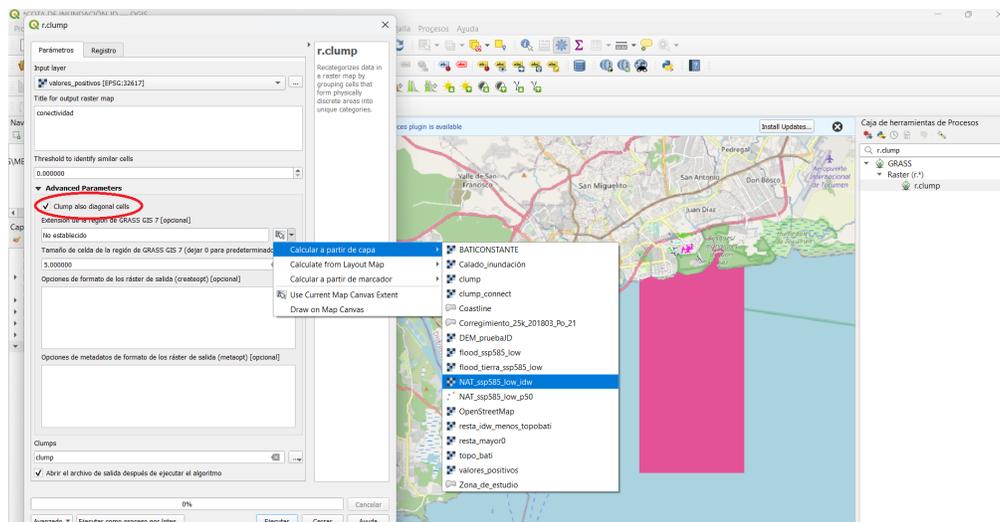


Figura 22. Relación de la conectividad física entre píxeles inundados.

Nota: El resultado es un ráster con las distintas manchas independientes detectadas. Nos interesa la mancha de color azul que es la conectada con el mar.

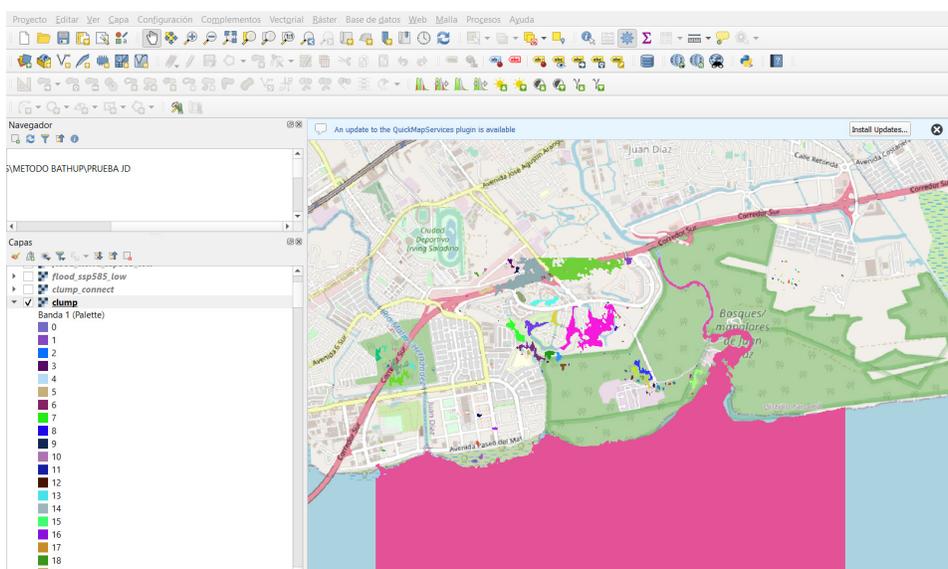


Figura 23. Ráster con las manchas de inundación en tierra conectadas al mar.

2.2.9. Selección de la mancha conectada con el mar

El proceso de selección de la mancha conectada con el mar implica la identificación de la masa de agua que presenta una conexión continua con el cuerpo marino. Esta etapa se realiza después de aplicar la herramienta Clump para determinar la conectividad entre los píxeles inundados. La selección se basa en criterios de proximidad y continuidad, donde se prioriza la mancha de agua que mantiene una conexión hidráulica directa con el océano.

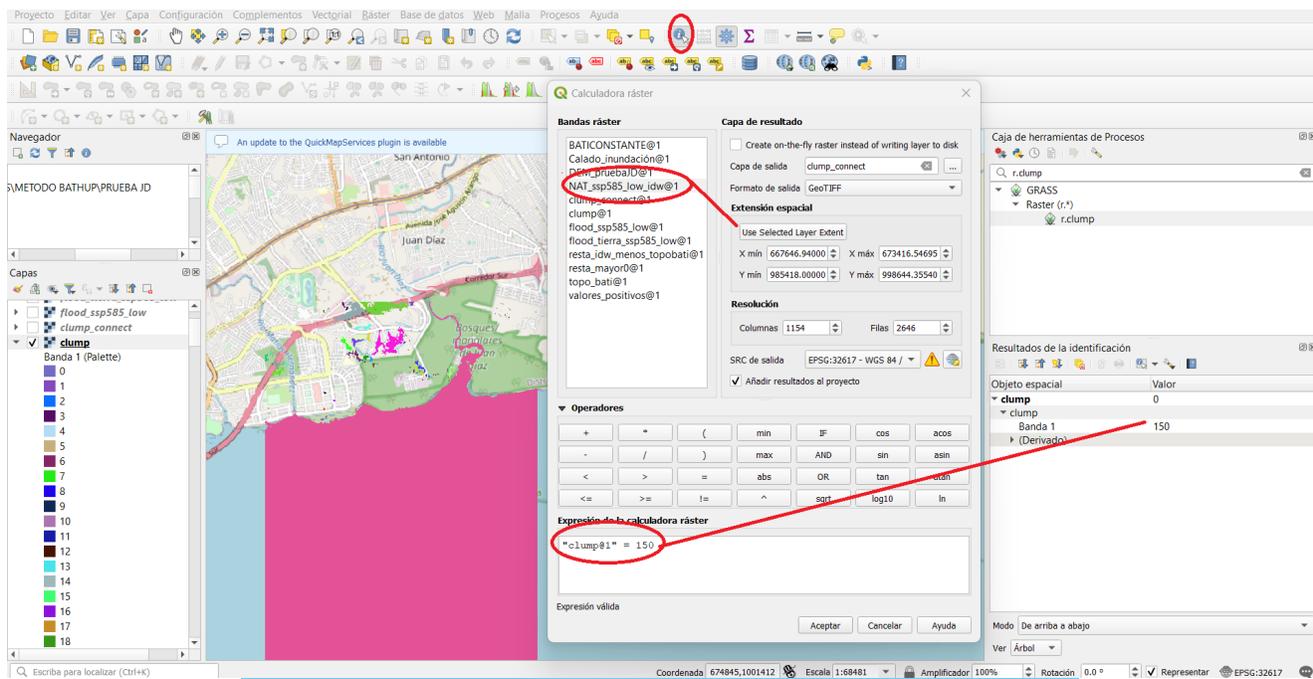


Figura 24. Pinchar sobre la mancha conectada con el mar para conocer su valor (150) en este caso.

2.2.10. Aplicación de la herramienta r.null

Este paso se realiza para eliminar del ráster generado todos los píxeles iguales a 0, es decir, que no pertenecen a la mancha conectada con el mar.

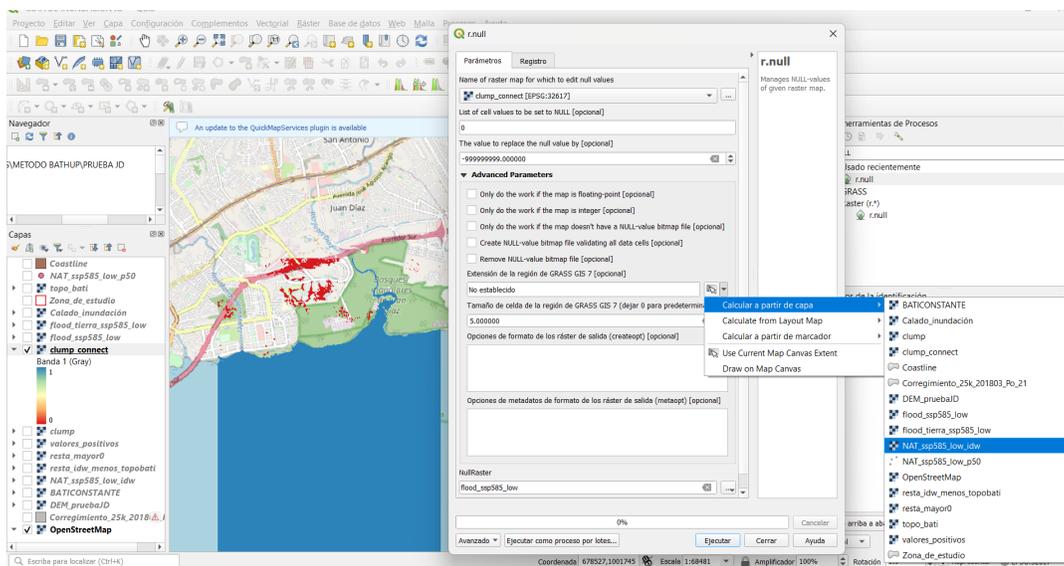


Figura 25. Se crea ráster binario con 1 = píxeles conectados al mar y 0 = no conectados con el mar.

Nota: El ráster obtenido ya corresponde con la inundación para el caso analizado y a partir de este se puede obtener el polígono que delimita la línea de costa. Sin embargo, para obtener la mancha de inundación final, nos interesa quitar y quedarnos solo con los píxeles inundados en tierra.

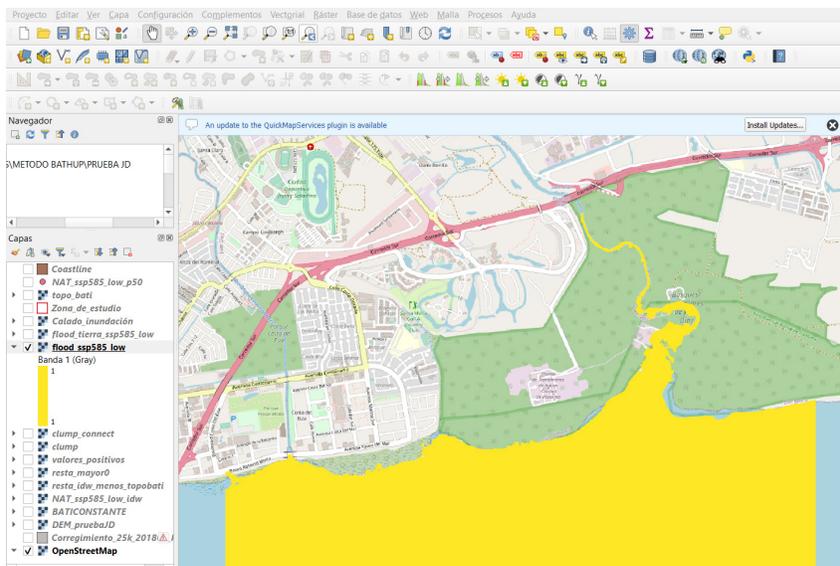


Figura 26. Ráster correspondiente a la inundación.

2.2.11. Ahora se aplica la herramienta clip o cortar ráster por capa de mascara

Primero se debe extraer el polígono de línea de costa, esto se realizará a partir de la extracción del área que se esté analizando, en este caso el polígono del corregimiento de Juan Diaz. Para ello se debe contar con la división política administrativa.

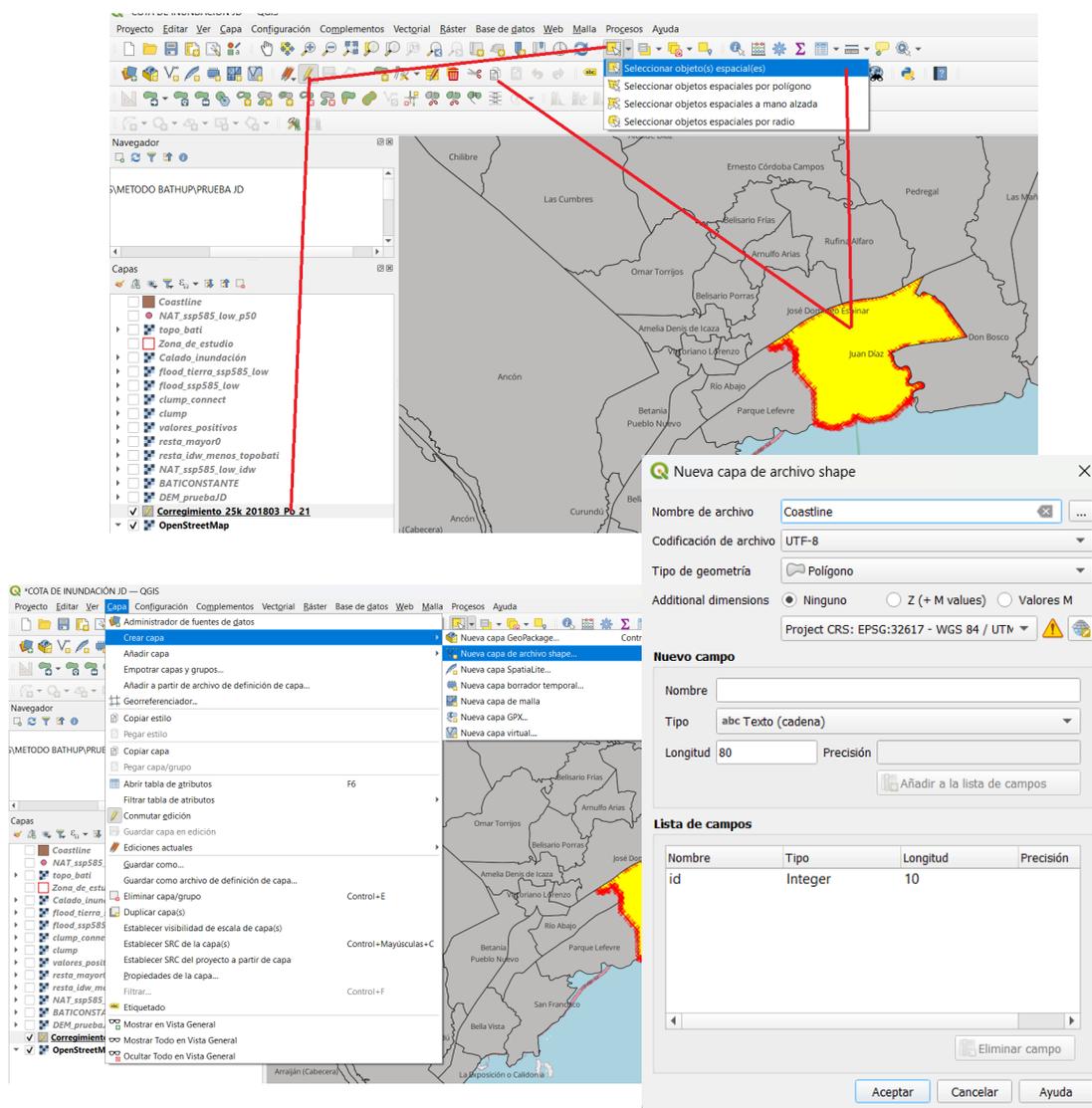


Figura 27. Extracción del polígono de la línea de costa.

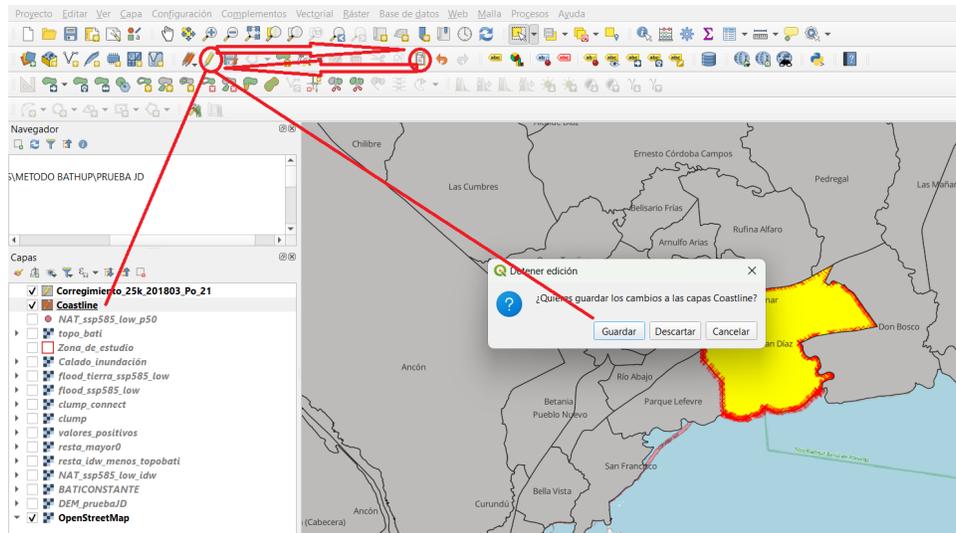


Figura 28. Guardar la extracción de la línea de costa.

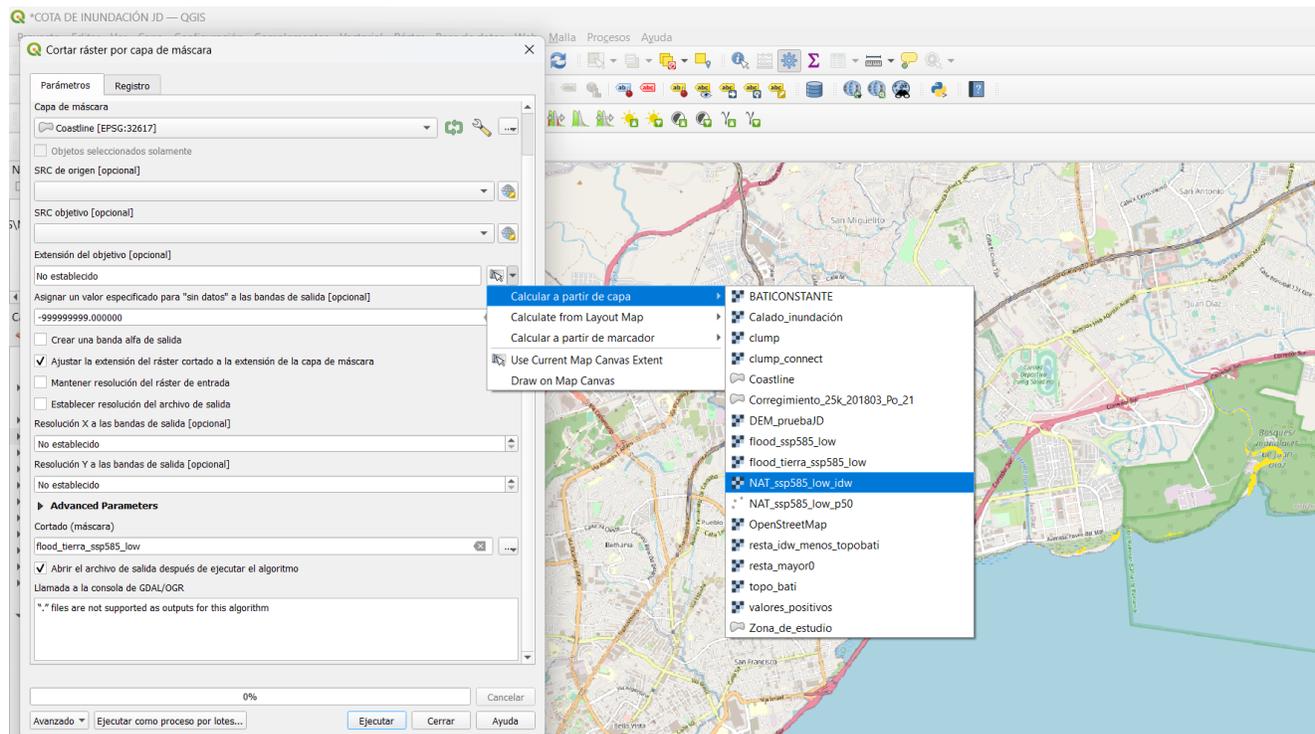


Figura 29. Mancha de inundación para el corregimiento de Juan Díaz, distrito de Panamá.

Nota: Esta es la mancha de inundación final en torno al corregimiento de Juan Díaz, distrito de Panamá para el caso del escenario SSP585, confianza baja y percentil 50%. Sin embargo, aquí aún no tenemos información sobre el calado de la inundación, es decir, sobre la altura de la lámina de agua en cada pixel inundado.

2.2.12. Aplicación la herramienta r.mask.rast

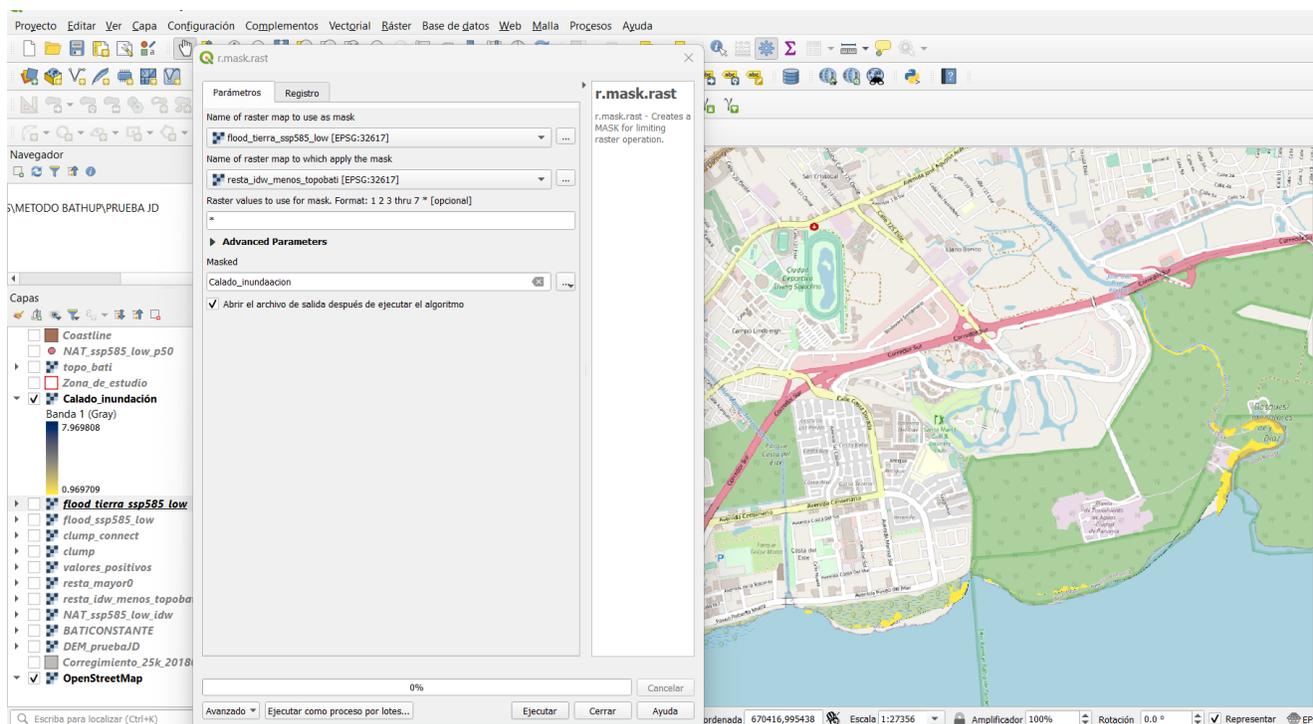


Figura 30. Cálculo y resultado del calado de inundación.

Nota: El ráster **resta_idw_menos_topobati** da la información sobre la cota de inundación, por lo que se corta solo para los píxeles inundados en tierra. El resultado final es la mancha de inundación con su cota de inundación en metros.

1.1.15. Comprobación de los resultados

Al final de todo el proceso se comprueba los resultados utilizando las capas generadas de:

- Topobati
- Nat_idw
- Cota de inundación

Se debe utilizar esta herramienta para pinchar sobre un pixel de interés.

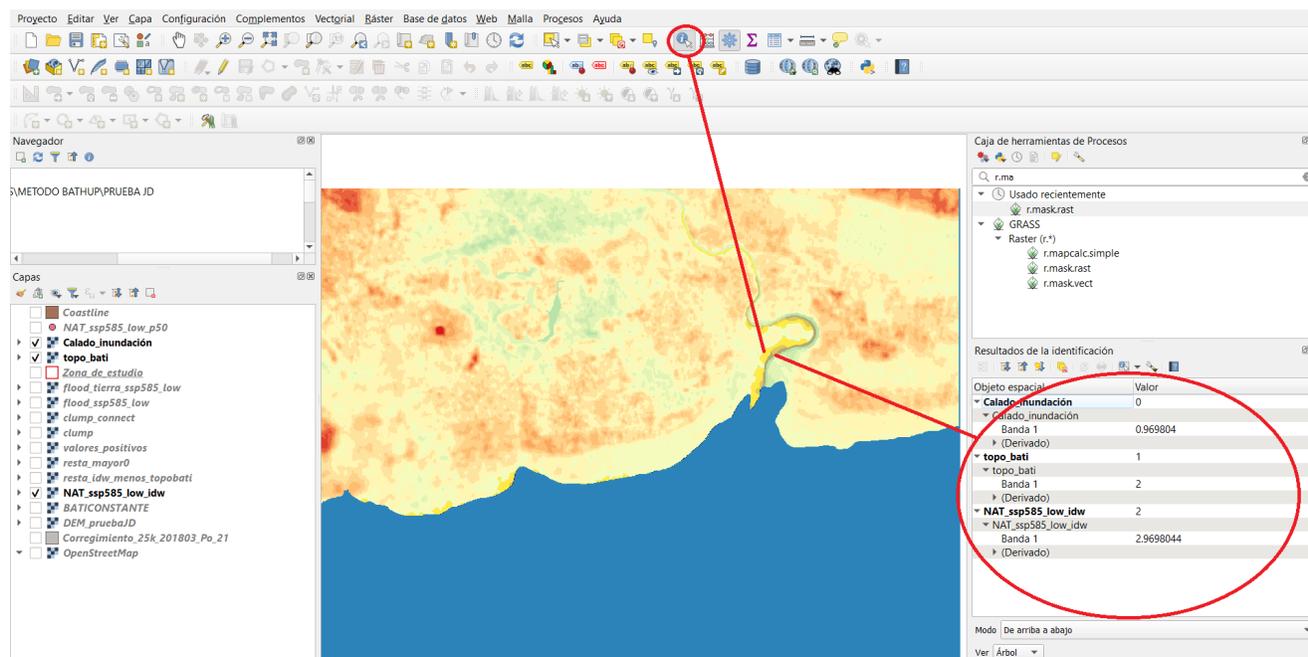


Figura 31. Comprobación de los resultados obtenidos, utilizando las capas de topobati.tif, NAT_idw y Cota de inundación.

Nota: En esta comprobación vemos que, para un pixel dado, la elevación de la topobati es de 2 m; la del NAT es de 2.969749 m y, por tanto, el calado de la inundación es de **0.969749 m**.

Finalmente, se obtiene el ráster para el mapa final con la cota de inundación para la zona de estudio.

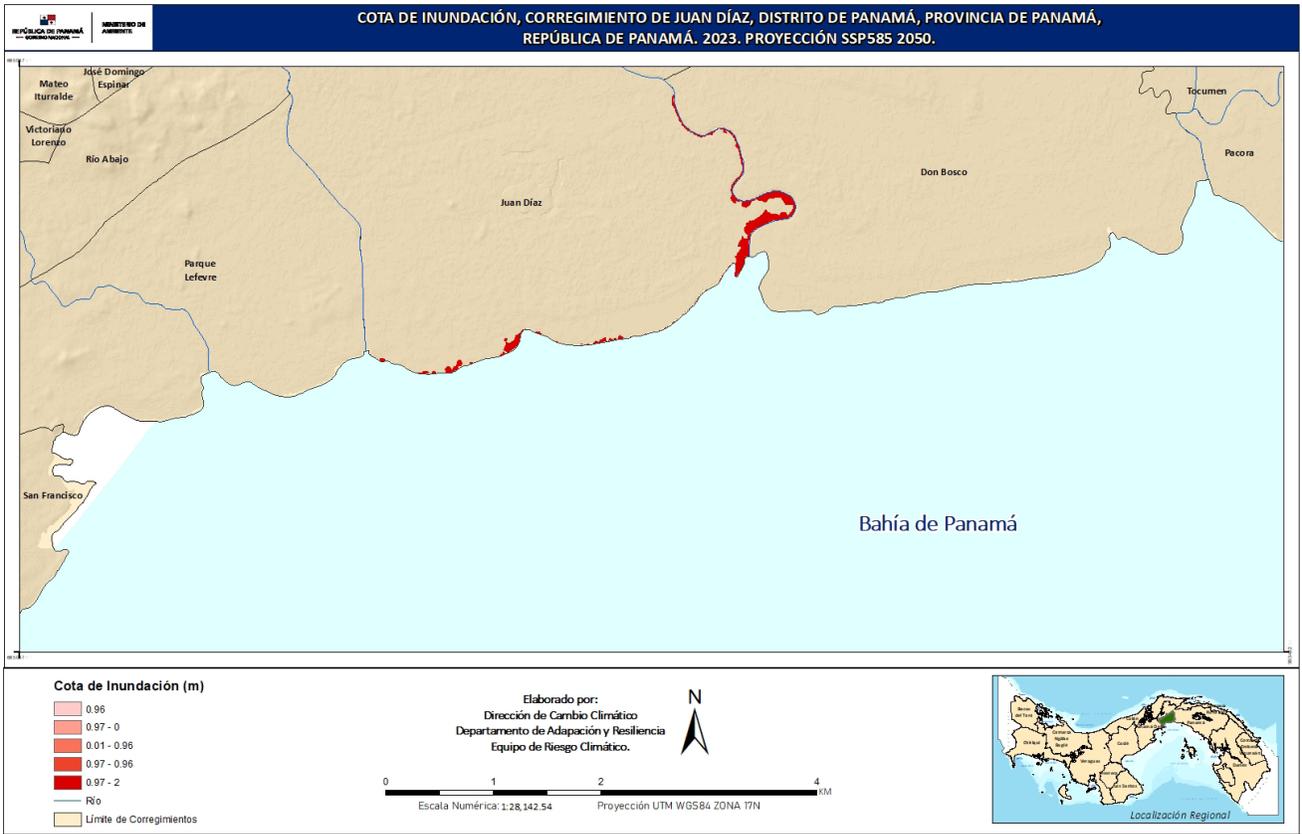


Figura 32. Mapa del Calado o Cota de Inundación para el corregimiento de Juan Díaz, distrito de Panamá, provincia de Panamá, República de Panamá. 2023. Proyección ssp585.





3. Conclusión

Este documento se ha elaborado con el objetivo de orientar a los diferentes actores que deseen realizar análisis en áreas pilotos a partir de los datos obtenidos del estudio Desarrollo de una base de datos de dinámicas marinas en las costas panameñas, 2022, presentado por el MiAmbiente.

A través de esta guía paso a paso podrán realizar análisis de inundaciones en zonas de interés con el objetivo de tener mayores detalles del impacto por ascenso del nivel del mar y con estos resultados poder identificar medidas de adaptación adecuadas para proteger las comunidades y los diferentes sectores socioeconómicos del país.



**MINISTERIO DE
AMBIENTE**