



Modelado Matemático de la Expansión del Lago de Valencia usando la Herramienta MatFlood

Torres T. Lisbeth J. ^{1,2*}

¹ *Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo. Naguanagua, Edo. Carabobo-Venezuela*

² *Centro Multidisciplinario de Visualización y Cómputo Científico (CEMVICC)*

* **Autor de correspondencia:** ltorres17@uc.edu.ve

Recibido: 29/01/2025, Revisado: 22/02/2025, Aceptado: 07/05/2025

Resumen

En este estudio se simulan los cambios morfológicos en el borde del lago asociados a fluctuaciones en los niveles de agua, utilizando el algoritmo MatFlood. Se diseñó un algoritmo de preprocesamiento de imágenes obteniendo un modelo de elevación digital, usado para estimar la extensión y profundidad de las expansiones del lago. MatFlood evaluó la conectividad hidráulica entre distintas zonas del lago, simulando el flujo hídrico en inundaciones, calculando niveles de inundación variables espacialmente (considerando topografía local y dinámica hídrica), e incorporando un factor de reducción para procesos no resueltos (fricción e infiltración). MatFlood se utilizó para evaluar la extensión y profundidad de la inundación en el lago a diferentes niveles de agua, obteniendo datos sobre áreas propensas a inundaciones. La optimización del preprocesamiento permitió resultados más precisos, fundamentales para la toma de decisiones y la simulación de la expansión del lago, identificando zonas vulnerables y ofreciendo una representación más realista de la dinámica de inundación.

Palabras Claves: Expansión, MatFlood, Factor de Reducción, Resolución Espacial, Eficiencia.

Mathematical Modeling of the Expansion of Lake Valencia using the MatFlood Tool.

Abstract

In this study, the morphological changes at the lake's edge associated with fluctuations in water levels are simulated using the MatFlood algorithm. An image preprocessing algorithm was designed to obtain a digital elevation model, used to estimate the extent and depth of the expansions of the lake. MatFlood evaluated the hydraulic connectivity between different areas of the lake, accurately simulating water flow during floods, calculating spatially variable flood levels (considering local topography and hydrodynamics), and incorporating a reduction factor for unresolved processes (friction and infiltration). MatFlood was used to evaluate the extent and depth of flooding in the lake at different water levels, providing data on flood-prone areas. The optimization of preprocessing allowed for more accurate results, essential for decision-making and simulating the lake's expansion, identifying vulnerable zones and offering a more realistic representation of flooding dynamics.

Keywords: Expansion, MatFlood, Reduction Factor, Spatial Resolution, Efficiency.

1. Introducción

Los cuerpos de agua, como lagos y ríos, juegan un papel fundamental en el equilibrio ecológico y en el desarrollo de las sociedades humanas. A nivel global, estos ecosistemas enfrentan desafíos como la contaminación, el cambio climático y la presión por el crecimiento urbano. Estos factores no solo alteran su dinámica natural, sino que también generan impactos sociales, económicos y ambientales en las comunidades circundantes.

El fenómeno de la expansión de los lagos es un ejemplo de estos desafíos. Este fenómeno puede deberse a factores como el cambio en los patrones de precipitación, el aumento de las temperaturas globales y la intervención humana. La expansión de un lago puede traer consecuencias graves, como la modificación de los hábitats naturales, la pérdida de tierras agrícolas y la afectación de zonas urbanas debido a inundaciones.

En el contexto de Venezuela, el Lago de Valencia, también conocido como Lago Tacarigua, es un ejemplo alarmante de los efectos de estos fenómenos. El Lago de Valencia, es el segundo lago más importante de Venezuela. Con una superficie de más de 390 km² y un volumen de 8500 km³, su cota actual ronda los 414 msnm. Su origen geológico se remonta al Terciario y Cuaternario, y actualmente sirve como embalse para ciudades como Maracay y Valencia. Sin embargo, enfrenta problemas críticos como la degradación de la calidad del agua, pérdida de biodiversidad y expansión urbana en sus márgenes.

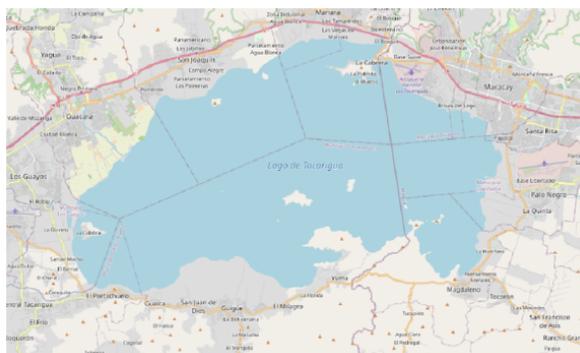


Figura 1. Límites del Lago de Valencia. Fuente: [3]

Las recurrentes inundaciones debido al aumento del nivel del lago amenazan a las poblaciones aledañas, causando pérdidas materiales, riesgos sanitarios y

desplazamiento poblacional. Este estudio busca cuantificar la relación entre la expansión del lago y las inundaciones mediante modelado matemático.

2. Datos

2.1 Modelos Digitales de Elevación (DEM)

Un modelo digital de elevaciones es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno.

Se emplearon tres DEM con resoluciones espaciales de 30 m (descargado desde USGS [2]), 12 m y 9 m (descargados desde LandViewer [3]). Estos permiten simular inundaciones con mayor precisión al capturar variaciones topográficas sutiles. Permitiendo de esta manera evaluar el impacto de la resolución espacial en la precisión de las simulaciones, se realizarán simulaciones de expansión utilizando los tres DEM.

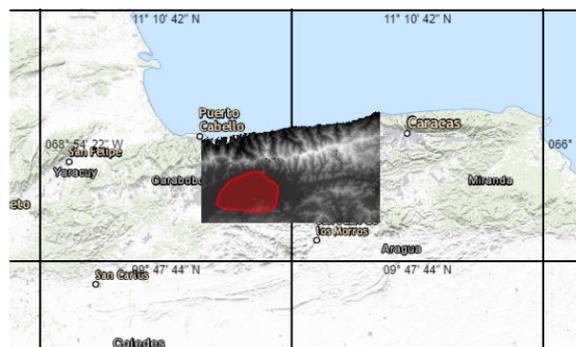


Figura 2. Modelo de Elevación. Fuente: Propia

2.2 Niveles de agua

La serie de datos históricos utilizada en este estudio se obtuvo a partir de una imagen publicada en un artículo de 2019 [4]. La imagen muestra la serie de niveles históricos que comprende el período 1727-2016. Para extraer la información numérica necesaria para el estudio, se llevó a cabo un proceso de digitalización y análisis de la imagen, ajustando los datos de manera que reflejaran con precisión la fuente original.

2.3 Imágenes Satelitales

Las imágenes satelitales son representaciones visuales y digitales de la superficie terrestre capturadas por

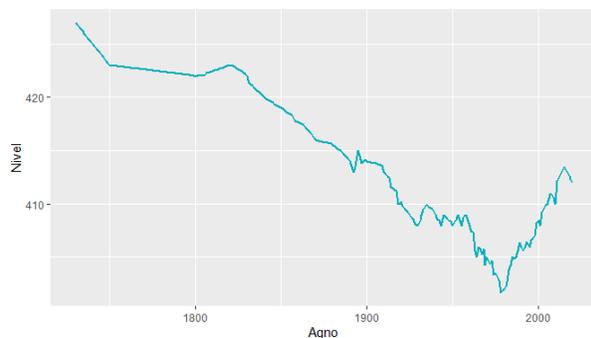


Figura 3. Serie histórica de niveles de agua en el Lago. Fuente: [4]

sensores remotos a bordo de satélites en órbita. Estas imágenes permiten analizar fenómenos geográficos y ambientales con alta precisión espacial y temporal. En el estudio de lagos, las imágenes satelitales son herramientas clave para monitorear su extensión, identificar cambios en su superficie a lo largo del tiempo y evaluar los impactos de fenómenos naturales o actividades humanas.

Como parte de la serie de datos históricos, se obtuvieron imágenes satelitales correspondientes a los años 2005 y 2012 con el objetivo de analizar las variaciones en la extensión del lago durante eventos extremos de precipitación. Estos años fueron seleccionados debido a que presentaron precipitaciones extraordinarias que resultaron en una significativa expansión del cuerpo de agua. Al comparar las simulaciones con las imágenes satelitales se podrá evaluar los cambios en la superficie del lago y su relación con los patrones hidrológicos extremos, proporcionando evidencia visual complementaria para respaldar los hallazgos del estudio.



Figura 4. Imagen satelital Octubre 2005. Fuente: [2]

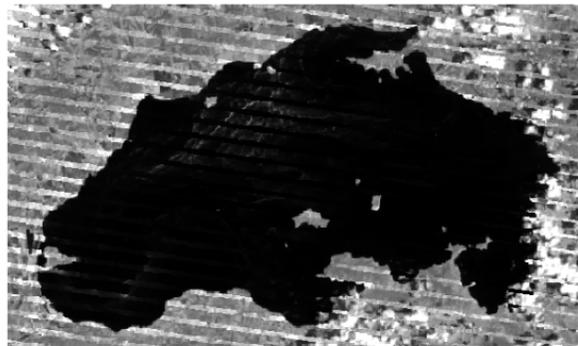


Figura 5. Imagen satelital septiembre 2012. Fuente: [2]

3. Metodología

En esta investigación, se llevaron a cabo simulaciones de los cambios morfológicos en el borde del lago, asociados a las variaciones en los niveles de agua.

A continuación, se describen los pasos implementados:

- Paso 1. Selección de Modelos de Elevación (DEM): Se seleccionaron tres modelos de elevación digital, correspondientes a altitudes de 30 metros, 12 metros y 9 metros, los cuales fueron descargados de la USGS.
- Paso 2. Preprocesamiento del Modelo de Elevación: Utilizando QGIS, se preprocesó el modelo de elevación digital para extraer una ventana que contuviera el lago. En este proceso, se obtuvieron las coordenadas de latitud y longitud de la ventana seleccionada.
- Paso 3. Modificación del Algoritmo MatFlood: Se adaptó el algoritmo MatFlood para que pudiera trabajar con la ventana extraída. Esto implicó cambiar el formato del modelo original de carga (archivo.mat) a un formato compatible (archivo.tif) utilizando la función `imread`.
- Paso 4. Incorporación de Datos de Elevación: Dado que MatFlood está diseñado para simular inundaciones a nivel del mar, se incluyó la elevación aproximada del lago, medida en metros sobre el nivel del mar (msnm.), utilizando información extraída de imágenes de niveles históricos.

Paso 5. Simulación de la Expansión del Lago: Se

utilizó el algoritmo MatFlood para simular la expansión del lago. Para ello, se necesitó el modelo de terreno, un punto específico (latitud, longitud) que identificara el cuerpo de agua y el nivel del lago (msnm.).

Paso 6. Generación de Imágenes de Simulación: El resultado de la simulación consistió en tres imágenes: la primera muestra la cuenca según el modelo de terreno; la segunda representa la simulación de la expansión del lago, asumiendo que esta se produce de manera uniforme; y la tercera imagen muestra la expansión utilizando un factor de reducción.

Paso 7. Procesamiento de Imágenes en QGIS: Las imágenes generadas (segunda y tercera) en formato.tif fueron procesadas en QGIS para asignarles una proyección adecuada. Esto permitió comparar la expansión simulada con la expansión real observada en imágenes satelitales.

Paso 8. Cuantificación de Diferencias: Se extrajeron los polígonos correspondientes al lago tanto de las simulaciones como de las imágenes satelitales. Posteriormente, se realizó una resta entre ambos polígonos para cuantificar correctamente la diferencia entre la expansión simulada y la real.

3.1 Algoritmo MatFlood

MatFlood [1] consta de dos componentes principales. El primer componente mapea la profundidad de la inundación en función del nivel del agua durante un evento de inundación. El segundo componente, el cual es opcional, emplea un factor de reducción para atenuar la extensión y profundidad de la inundación. MatFlood se ilustra con un diagrama de flujo de trabajo en la Figura 6.

MatFlood requiere tres entradas principales:

1. Modelo Digital de Elevación del Terreno (MDT) en formato ráster, incluyendo la elevación (z) y las coordenadas. Los MDE incluyen Modelos Digitales de Superficie (MDS) o Modelos Digitales del Terreno (MDT). Análisis previos han demostrado que la elección entre usar MDS o MDT tiene un impacto considerable en la precisión de los escenarios de

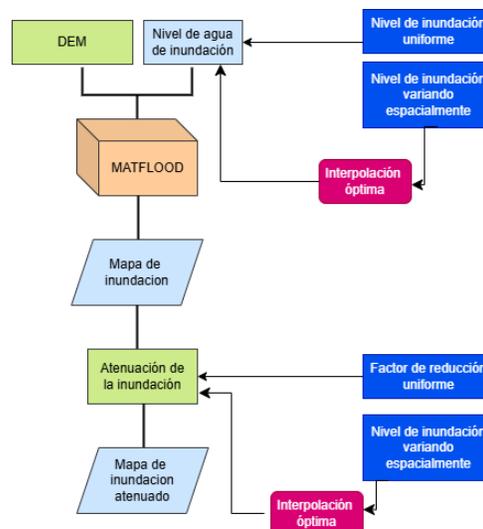


Figura 6. Diagrama de Flujo de MatFlood. Fuente: propia

inundación simulados (Williams y Lück-Vogel, 2020). Como se mencionó anteriormente, se recomienda utilizar un MDE de alta resolución para obtener resultados más precisos. Sin embargo, es importante destacar que MatFlood es compatible con ambos tipos de MDE, pudiendo adaptarse a diferentes resoluciones de datos MDE.

2. Nivel de agua de referencia para la inundación: El nivel del agua de inundación se refiere al nivel vertical del agua que produce la inundación y debe basarse en el mismo datum vertical del marco de referencia geodésico que el MDE.
3. Punto único que identifica el cuerpo de agua principal del que se produce la inundación, denominado en adelante lp (punto de localización). Utilizamos el término “cuerpo de agua principal” porque MatFlood se puede aplicar a cualquier interfaz agua-tierra (lagos, ríos y el océano). A continuación, nos referiremos al cuerpo de agua principal como “mar” para simplificar. El punto de localización, lp , es un punto único de longitud y latitud, indicado por el usuario, y ubicado dentro del mar (el polígono del mar se denomina polígono principal de agua, PPW1 en la Figura 7).

En la Figura 7 se muestra los datos elevación utilizados para ilustrar la metodología. Los colores azules representan el polígono principal de agua o mar, las

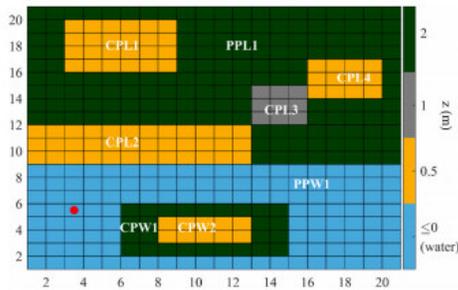


Figura 7. Datos de elevación z (en metros).

Fuente: [1]

áreas verdes son celdas con elevaciones de 2 m y, por lo tanto, están por encima del nivel de inundación (1 m). Las celdas amarillas (0,5 m) y grises (1 m) son áreas por debajo o al mismo nivel que el agua de la inundación, respectivamente, y por lo tanto están sujetas a inundaciones. El punto rojo muestra la ubicación (lp), utilizada para delimitar el polígono del mar. En las siguientes secciones se introduce el algoritmo para simular la inundación (Sección 3.2.1), la descripción de las características adicionales para obtener el nivel del agua de inundación espacialmente variable (Sección 3.2.2) y para atenuar la profundidad y extensión de la inundación mediante la aplicación de un factor de reducción (Sección 3.2.3). La metodología se ilustra considerando una topografía básica z de tierra/mar (Figura 7) y un nivel de agua de inundación de 1 m. La resolución horizontal es de 1 metro cuadrado (cada celda en la Figura 7). Dentro del mar (el polígono principal de agua, PPW1), hay dos polígonos que representan áreas terrestres de diferentes elevaciones (polígono hijo en agua 1 y 2, CPW1 y CPW2). En el área terrestre (PPL1), hay cuatro áreas encapsuladas de elevaciones más bajas (CPL1 a CPL4).

3.1.1 Algoritmo de Inundación

Una primera estimación del área inundada se obtiene restando el nivel del agua de inundación (fwl) de la elevación del terreno (z), obteniendo una cuadrícula de elevación inundada (z_F) de tamaño Yx [1].

$$z_F = z - fwl. \tag{1}$$

Dado que tanto el nivel del agua de inundación (fwl) como el MDE (z) se refieren al mismo datum vertical, los valores positivos en z_F representan áreas

terrestres/secas, mientras que los valores negativos y cero indican agua. En z_F , las elevaciones iguales o inferiores al nivel del agua de inundación están inundadas. En el ejemplo, el polígono del mar ahora incluye PPW1, CPL2, CPL3 y CPL4 (Figura 8). En este paso, la conectividad hidrológica aún no se ha considerado y, por lo tanto, z_F también incluye áreas inundadas no conectadas al mar (CPL1 y CPW2 en la Figura 8). Para tener en cuenta la hidroconectividad, el algoritmo debe identificar y separar el polígono del mar. Para ello, z_F se convierte en una matriz binaria en blanco y negro de unos (agua) y ceros (tierra), z_{BW} :

$$z_{BW} = \begin{cases} 0 & z_F > 0 \\ 1 & z_F \leq 0. \end{cases} \tag{2}$$

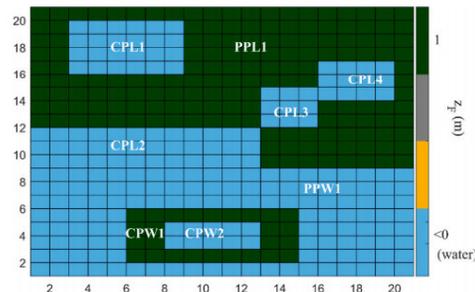


Figura 8. z_F : z inundada antes de considerar la hidroconectividad. Fuente: [1]

En la Figura 8 los colores azules indican áreas por debajo del nivel del agua de inundación y, por lo tanto, inundadas. El mar se ha extendido desde PPW1 para incluir también las áreas CPL2, CPL3 y CPL4. Tenga en cuenta que las conexiones hidrológicas aún no se han tenido en cuenta; por lo tanto, CPW2 y CPL1 están inundadas a pesar de no estar conectadas al mar.

Produciendo una matriz binaria que permite identificar cada polígono de agua y tierra, independientemente de la elevación. Para aislar los polígonos en z_{BW} , modificamos una función existente de procesamiento de imágenes de MATLAB, denominada *bwboundaries* (Gonzalez et al., 2004), que identifica los objetos más externos (“padres”) así como los polígonos sucesivos encerrados por ellos (“hijos”). La función modificada, *bwboundaries_SFM*, permite una forma más rápida de delinear todos los polígonos en z_{BW} . Usamos *bwboundaries_SFM* teniendo en cuenta la conectividad de 8 vecinos, es decir, los píxeles están

conectados si sus bordes o esquinas se tocan en la dirección horizontal, vertical o diagonal.

$$P = bwboundaries_SFM(z_{BW}). \quad (3)$$

La salida, P , es una matriz Yx que contiene un número de identificación (id) para cada polígono detectado (Figura 9). El polígono que incluye el mar y las áreas inundadas, $P_{mwb,Fl}$, lo identifica el algoritmo ya que incorpora l_p . La profundidad de las áreas inundadas se calcula como la diferencia entre la topografía (z) y el nivel del agua de inundación (f_{wl}) para aquellas celdas dentro de $P_{mwb,Fl}$:

$$z_{FHC} = \begin{cases} z & id \neq P_{mwb,Fl} \\ z - f_{wl} & id = P_{mwb,Fl} \end{cases} \quad (4)$$

donde z_{FHC} (Topografía inundada teniendo en cuenta la Conectividad Hidrológica) es una matriz Yx donde solo las áreas debajo del nivel del agua de inundación e hidrológicamente conectadas al mar están inundadas (Figura 10).

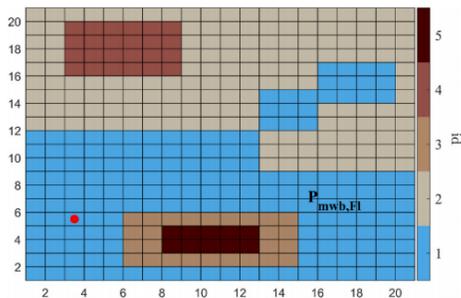


Figura 9. Polígonos (padres e hijos) encontrados en z_{BW} . Fuente: [1]

En la Figura 9 se identificaron cinco polígonos diferentes: los polígonos padre tienen $id = 1, 2$. Dentro de los polígonos padre, dos polígonos hijos ($id = 3, 5$) se encuentran dentro del polígono del mar, $P_{mwb,Fl}$, y un polígono hijo está en el área continental principal ($id = 4$). El punto rojo muestra el punto de ubicación, l_p

En la Figura 10 los colores azules son áreas inundadas. Debido a que el polígono CPL3 está originalmente 1 m por encima del suelo (Figura 1), CPL3

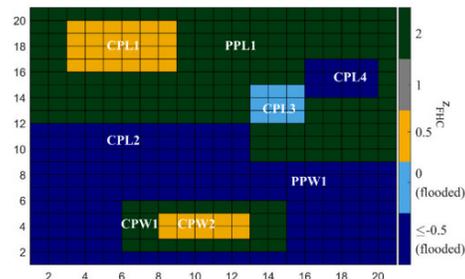


Figura 10. Mapa de inundación teniendo en cuenta la hidroconectividad, z_{FHC} . Fuente: [1]

es 0 m mientras que CPL4 es -0.5 m ya que la topografía de esa área tiene una elevación de 0.5 m. Las áreas con elevaciones por debajo del nivel del agua de inundación (1 m) pero no conectadas al mar (CPL1 y CPW2, en amarillo) no están inundadas, así como las áreas por encima del nivel del agua de inundación (CPW1 y PPL1, en verde). Las áreas no inundadas toman valores z .

3.1.2 Niveles de agua de entrada espacialmente variables

Normalmente, en el modelado de inundaciones estáticas, se asume que el nivel del agua de inundación es espacialmente uniforme en todo el dominio (como se hizo en la Sección 3.1.1). Al hacerlo, se descuida la variabilidad del nivel del agua a lo largo de la costa, lo que potencialmente conduce a una sobreestimación o subestimación de la inundación en algunas áreas. La consideración de niveles de agua espacialmente variables se vuelve particularmente pertinente en la simulación de inundaciones en áreas extensas, donde se anticipa una mayor variabilidad del nivel del agua. Por el contrario, las áreas más pequeñas a lo largo de la costa pueden presentar variaciones menos pronunciadas en los niveles del agua, lo que hace que la distinción entre emplear un nivel de agua de inundación uniforme o variable sea menos significativa.

La variabilidad espacial de los niveles del agua se puede capturar mediante un conjunto de niveles del agua observados/modelados dispersos por el área de estudio. Para simplificar, nos referimos a ellos como estaciones de monitoreo; $W_{i=1}^N = \{w_i, \dots, w_N\}$, siendo N el número de estaciones de monitoreo donde hay información disponible sobre el nivel del agua. Siguiendo a Agulles et al. (2020), aplicamos un método de interpolación óptima para interpolar la infor-

mación del nivel del agua (W) en las estaciones de monitoreo sobre toda el área de estudio. El nivel del agua de inundación espacialmente variable resultante (\widehat{Uwl}) consiste en una combinación lineal de los niveles del agua en las estaciones de monitoreo (W) y un campo de fondo (es decir, una primera suposición), con pesos determinados a partir de las covarianzas de W y el fondo. En nuestro caso, el fondo se determina como el promedio entre los niveles del agua contenidos en W . En otras palabras, \widehat{Uwl} es una cuadrícula bidimensional que contiene anomalías del nivel del agua por encima/por debajo del promedio, donde las celdas tienden a valores similares a la estación de monitoreo más cercana. Las celdas alejadas de la estación de monitoreo tienden al promedio de W .

La Figura 11 muestra el nivel del agua de inundación espacialmente variable, para el ejemplo ilustrativo, obtenido al aplicar el método de interpolación óptimo a cinco niveles de agua individuales; $W = 0.2, 0.7, 1, 0.7, 0.7, 0.5$ en metros. Los colores de la cara del triángulo indican los niveles de agua individuales. Las etiquetas del polígono se incluyen en la Figura 11 como referencia. Tenga en cuenta que la topografía, y por lo tanto la ruta de inundación, no se consideran al calcular el nivel del agua espacialmente variable. La formulación original del algoritmo de interpolación óptima se puede encontrar en otros lugares (por ejemplo, consulte Bretherton et al., 1976; Daley, 1993); aquí, sólo se resumen las características principales del algoritmo.

\widehat{Uwl} , de tamaño Yx , se obtiene mediante:

$$\widehat{Uwl} = BK + S^T \cdot D^{-1} \cdot d \tag{5}$$

donde BK es una matriz Yx que contiene la información de fondo. S es una matriz $M \times N$ que contiene la covarianza de las distancias euclidianas entre el modelo de elevación digital y las estaciones de monitoreo (W), que luego se modelan utilizando una función gaussiana:

$$PS = e^{-d1_{ij}^2/2L^2} \tag{6}$$

$d1_{ij}$ es la distancia entre cada punto j del modelo de elevación digital y cada estación de monitoreo contenida en W .

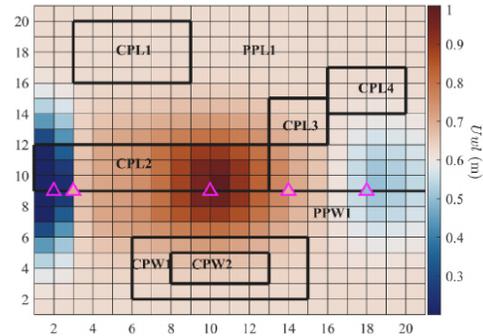


Figura 11. Nivel de inundación espacialmente variable (m). Fuente: [1]

L es la escala de longitud de correlación espacial. Valores menores de L dan como resultado una menor variabilidad espacial de los niveles del agua de inundación, lo que limita la influencia de cada valor individual del nivel del agua a la vecindad de la estación de monitoreo correspondiente. Simultáneamente, valores menores de L preservan mejor la magnitud del nivel del agua en la estación de monitoreo. Por el contrario, valores más altos de L generan una huella espacial más amplia para cada nivel del agua de inundación individual. Sin embargo, los niveles del agua en las estaciones de monitoreo se suavizan ligeramente cuando se usan valores más altos de L . El objetivo de utilizar el método de interpolación óptima es simular un nivel del agua de inundación espacialmente variable que represente con precisión la variabilidad máxima en toda el área de estudio, al tiempo que conserva los datos del nivel del agua de inundación en las estaciones de monitoreo. Por lo tanto, el algoritmo estima el valor óptimo de L como el valor máximo de la relación entre la desviación estándar del nivel del agua de inundación interpolado ($STD(\widehat{Uwl})$) y la diferencia media entre el nivel del agua de la cuadrícula interpolada en las estaciones de monitoreo y el nivel del agua registrado por las estaciones de monitoreo ($\widehat{Uwl} - W$):

$$L = \text{máx} \left(\frac{STD(\widehat{Uwl})}{\widehat{Uwl} - W} \right) \tag{7}$$

Se prueban valores de L de 0.5 a 100 con incrementos de 0.5.

D_0^* es una matriz $N \times N$ que contiene la covarianza de las distancias euclidianas entre W . Nuevamente,

D_0^* se modela usando una función gaussiana:

$$D_0^* = e^{-d2_{ij}^2/2L^2}. \tag{8}$$

En este caso, $d2_{ij}$ es la distancia entre las estaciones de monitoreo i y j . Asumimos que los niveles del agua (de simulaciones u observaciones) son perfectos; sin embargo, los datos de los medidores del nivel del agua y las salidas del modelo tienen incertidumbre. Incluimos un error en la matriz de covarianza D^* . ϵ es una matriz diagonal $N \times N$ que contiene un error de observación de 0.01. La matriz de covarianza D^* se modifica entonces como:

$$D^* = D_0^* + \epsilon \tag{9}$$

d , en la Ecuación (5), es un vector $N \times 1$ que contiene las anomalías entre los niveles del agua en las estaciones de monitoreo (W) y el fondo:

$$d = W - BK. \tag{10}$$

El área inundada por un nivel de agua espacialmente variable ($z_{FHC,V}$) se obtiene aplicando el método descrito en la Sección 3.1.1 utilizando el nivel de agua espacialmente variable en lugar de un nivel de agua de inundación uniforme.

Siguiendo el ejemplo de la Sección 3.1.1, la Figura 10 muestra el nivel del agua de inundación espacialmente variable resultante obtenido de cinco estaciones de monitoreo diferentes, en metros, $W = 0,2,0,7,1,0,7,0,7,0,5$. La Figura 12 muestra el mapa de inundación resultante cuando se usa el nivel de agua de inundación espacialmente variable ($z_{FHC,V}$). Tenga en cuenta que tanto la profundidad como la extensión de la inundación se reducen en comparación con el uso de un nivel de agua de inundación uniforme (z_{FHC}). En comparación con la Figura 10, el uso de una superficie de agua variablemente espacial ha evitado la inundación de la región CPL3 y, por lo tanto, CPL4. Además, las celdas más cercanas a la $W = 0,2$ m (Figura 11), no están inundadas, ya que esas celdas de la cuadrícula tienen una elevación de 0.5 m.

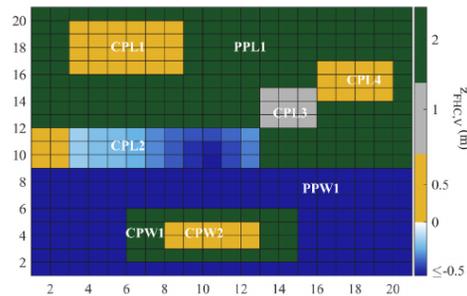


Figura 12. Mapa inundado después de usar un nivel de agua de inundación espacialmente variable .

Fuente: [1]

En la Figura 12 las áreas azules representan celdas inundadas. Las áreas no inundadas toman valores z . Se debe tomar en cuenta que los valores en el mar mantienen la elevación original (Sección 3.1.1).

3.1.3 Aplicación de un factor de reducción

El enfoque estático descuida la hidrodinámica de las inundaciones y, de hecho, asume que todas las regiones potencialmente inundables se inundarán instantáneamente cuando alcance su nivel máximo de agua. Sin embargo, una combinación de controles hidráulicos, resistencia aerodinámica y rugosidad hidráulica impide las corrientes de inundación e impone un lapso de tiempo para que ocurra la inundación en cada punto. Por lo tanto, un enfoque estático puede sobreestimar en gran medida la extensión y la profundidad de la inundación, como se menciona en la introducción.

Para abordar la sobreestimación esperada de la inundación, y siguiendo estudios previos (Ward et al., 2020; Williams y Lück-Vogel, 2020), MatFlood incorpora un factor de reducción que disminuye tanto la profundidad de la inundación (que representa la cantidad de agua en el eje vertical) como la extensión de la inundación (que se refiere a la zona inundada). La atenuación de la inundación depende de la distancia a la costa y de una tasa definida por el usuario, por lo que se puede ajustar a las particularidades del área de estudio. La reducción de la inundación se aplica como paso posterior al procesamiento después de generar el mapa de inundación (Figura 6). Cabe destacar que el uso del factor de reducción es opcional. Además, el factor de reducción puede ser uniforme o variable espacialmente, según los requisitos específicos del análisis. Se proporcionan explicaciones detalladas en

las secciones siguientes.

La metodología consiste en (a) delinear la línea de costa, (b) calcular la distancia de cada punto en los datos de elevación (DEM) a la línea de costa y (c) aplicar la tasa definida por el usuario. En este estudio, la línea de costa se refiere a la intersección del mar y la tierra en condiciones tranquilas, representando el estado previo a la inundación.

Para delinear la línea de costa, utilizamos la función MATLAB `edge`, que toma una imagen binaria como entrada y devuelve una imagen binaria del mismo tamaño, con 1's donde se encuentra el borde y 0's en otros lugares. Tenga en cuenta que la línea de costa se identifica utilizando los datos de elevación iniciales (z) y no el mapa de inundación. La matriz binaria de entrada (z_{BW0}) se define para tomar valores de 1 para las celdas ubicadas en el mar y 0 en caso contrario. Para obtener z_{BW0} , las ecuaciones (1)-(3) se aplican a z utilizando un nivel uniforme de agua de inundación de 0 m. Luego, la Ecuación (4) se modifica a:

$$z_{BW0} = \begin{cases} 0 & id \neq P_{mwb,Fl} \\ 1 & id = P_{mwb,Fl}. \end{cases} \quad (11)$$

Luego, `edge` se aplica a z_{BW0} :

$$SH = edge(z_{BW0}) \quad (12)$$

SH contiene las coordenadas de la línea de costa.

La tasa de reducción de inundación definida por el usuario (RF) se define como la profundidad vertical del agua reducida (v_{rwd}) sobre una distancia horizontal (h_d):

$$RF = v_{rwd}/h_d. \quad (13)$$

Esta tasa luego se aplica al mapa inundado (z_{FHC}) como:

$$z_{F,R} = z_{FHC} + (RF \times D^*) \quad (14)$$

D^* contiene la covarianza de las distancias euclidianas entre cada punto de la cuadrícula computacional

y la línea de costa. Este cálculo puede ser computacionalmente costoso en áreas grandes o cuando se usa una alta resolución espacial. Para mejorar la demanda computacional, las distancias se calculan sobre una cuadrícula computacional de resolución reducida y luego se vuelven a interpolar a la resolución original. Tenga en cuenta que solo las distancias se calculan sobre una cuadrícula de resolución reducida, el mapa inundado conserva su resolución original, por lo que la precisión de los mapas de inundación no se ve afectada. Las áreas que ya no están inundadas debido a la aplicación del factor de reducción toman valores de los datos de elevación iniciales (z):

$$z_{F,R} = \begin{cases} z_{F,R} & z_{F,R} \leq 0 \\ z & z_{F,R} > 0. \end{cases} \quad (15)$$

Por lo tanto, según la Ecuación (14), la cantidad de inundación atenuada por el factor de reducción depende de la distancia a la costa y la profundidad de la inundación, que en última instancia está determinada por la elevación topográfica. En algunos casos, la conectividad hidráulica podría no mantenerse después de aplicar el factor de reducción. Se refuerza la conectividad hidrológica ejecutando nuevamente el algoritmo de inundación estático (Sección 3.1.1) usando un nivel de agua de inundación de 0 m. Al hacerlo, obtenemos la profundidad y extensión de la inundación atenuada por el factor de reducción y teniendo en cuenta la hidroconectividad (denominada $z_{FHC,R}$). Tenga en cuenta que, en este caso, hemos aplicado el factor de reducción al mapa inundado por un nivel uniforme de agua de inundación (z_{FHC}), ya que hemos demostrado que el nivel de agua de inundación espacialmente variable ya reduce la extensión y profundidad de la inundación. Sin embargo, se puede usar el mapa inundado por un nivel de inundación espacialmente variable.

Siguiendo el método de interpolación óptima utilizado para obtener niveles de inundación espacialmente variables (Sección 3.1.2), el algoritmo permite calcular un factor de reducción espacialmente variable dado un conjunto de factores de reducción distribuidos por el área de estudio. El enfoque sigue los mismos pasos que en la Sección 3.1.2 utilizando un conjunto de tasas de reducción de inundación definidas por el usuario en lugar de niveles de inundación.

A fines de demostración, hemos empleado una tasa de 0.0417 al área inundada previamente simulada. Tenga en cuenta que este valor se elige para ilustrar la metodología pero no tiene ningún significado físico. En este ejemplo, 0.0417 reduce la profundidad de la inundación en 0.5 m cada 12 m en horizontal. La Figura 8 muestra los resultados después de tener en cuenta la conectividad del agua. La profundidad y extensión de la inundación se han atenuado como se puede ver al comparar el mapa de inundación antes (Figura 5) y después (Figura 8) de aplicar el factor de reducción: CPL3 y CPL4 ya no están inundadas. Además, la profundidad de la inundación se redujo en 0.5 m en la zona terrestre en CPL2.

3.2 Serie temporal de niveles

La serie de niveles anuales del Lago de Valencia, que recaba información de datos históricos desde el año 1730 hasta el año 2020, fue reconstruida a partir de la figura 3 proporcionada por [4]. En la figura 3 destacan las siguientes características sobre la serie de niveles:

- Nivel mínimo 401.7 (año 1978)
- Nivel máximo 427 (año 1726)
- Se nota una tendencia general a la disminución del nivel del lago hasta aproximadamente el año 1978
- A partir de 1978 se aprecia una tendencia al aumento del nivel del lago.

Inicialmente para reconstruir la serie, se emplearon técnicas manuales para extraer los valores de nivel visibles en la gráfica, digitalizando puntos clave y registrando sus correspondientes años y niveles. Debido a la naturaleza incompleta de la información visual, se recurrió a algoritmos de interpolación y extrapolación, se estimaron los niveles anuales en los periodos donde la información era ausente o ambigua, asegurando así una serie temporal continua y coherente.

En la Tabla 1 se muestran los niveles de algunos años seleccionados de la serie reconstruida. En rojo se resalta el nivel más bajo registrado hasta el momento del lago.

Esta serie de datos de niveles se utilizará en conjunto con MatFlood para realizar las estimaciones de expansión del lago.

Año	Nivel	Año	Nivel
1973	404.70	2009	410.54
1974	403.40	2010	410.00
1975	403.50	2011	412.19
1976	403.20	2012	412.52
1977	402.90	2013	412.84
1978	401.70	2014	413.17
1979	401.90	2015	413.50
1980	402.00	2016	413.20
1981	402.33	2017	412.90
1982	402.66	2018	412.60
1983	403.90	2019	412.30
1984	404.31	2020	412.00

Tabla 1. Serie de niveles históricos del lago

3.3 Representación de la cuenca

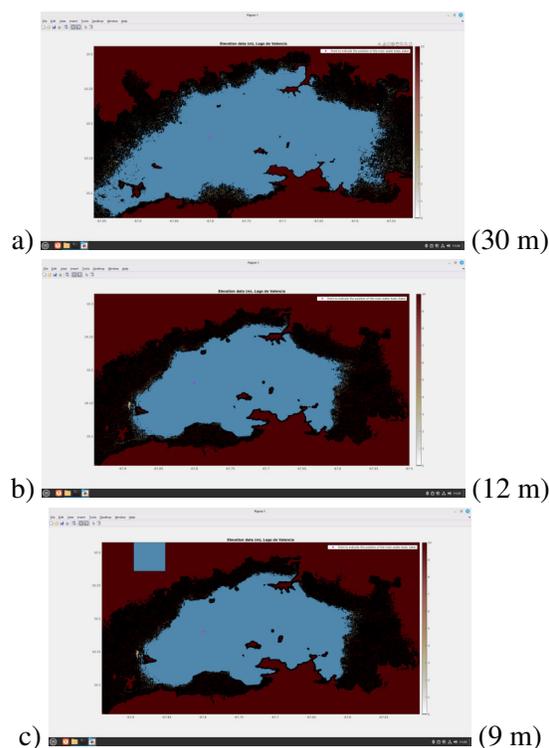


Figura 13. Representación topográfica del lago usando diferentes resoluciones. Fuente: Propia

En la Figura 13 a) se observa una representación general de la cuenca utilizando un DEM con resolución de 30 m. La forma del lago es reconocible, pero los detalles finos de la costa y la topografía circundante

son limitados. La resolución de 30 metros significa que cada píxel representa un área de 30x30 metros en el terreno. Esto puede suavizar los detalles y no capturar características pequeñas pero importantes. El algoritmo no logra captar detalles importantes del borde con esta resolución.

En la Figura 13 b) se tiene la representación topográfica del lago con resolución 12 m. Se aprecia un mayor detalle en la forma de la costa y la topografía. Las islas dentro del lago y las variaciones en la elevación son más visibles.

En la Figura 13 c) se observa la representación topográfica del lago con resolución 9 m. Se observa buen nivel de detalle, sin embargo a simple vista pareciera ser tan informativa como la de 12 m. Un detalle a resaltar es que la costa del lago muestra una mayor rugosidad y las variaciones en la topografía son más pronunciadas. Las islas y otros accidentes geográficos se definen con mayor claridad.

Observando la Figura 13 se puede afirmar que a medida que aumenta la resolución del DEM (de 30 m a 12 m y 9 m), la representación de la cuenca del Lago de Valencia se vuelve más detallada y precisa. Esto permite capturar características topográficas más finas y realizar análisis más detallados. esta información es de gran importancia al momento de seleccionar el DEM adecuado para las simulaciones.

3.4 Análisis del impacto de la Resolución del DEM

En la figura 14 se muestra tres simulaciones de la expansión del Lago de Valencia, cada una generada utilizando un DEM con diferente resolución espacial: 30 metros (a), 12 metros (b) y 9 metros (c). A partir de la imagen se puede visualizar cómo la resolución del DEM influye en la precisión de la simulación de inundación. La simulación de la expansión ha sido ubicada encima de una imagen actual del lago.

La simulación usando un DEM a 30 m se aleja significativamente del borde actual, resultando de esta simulación que desaparezcan bajo el agua localidades enteras como Barrio Brisas del Lago, Santa Rita y Paraparal entre otros, en la zona este del lago, hacia el estado Aragua. La simulación claramente sobreestima la inundación.

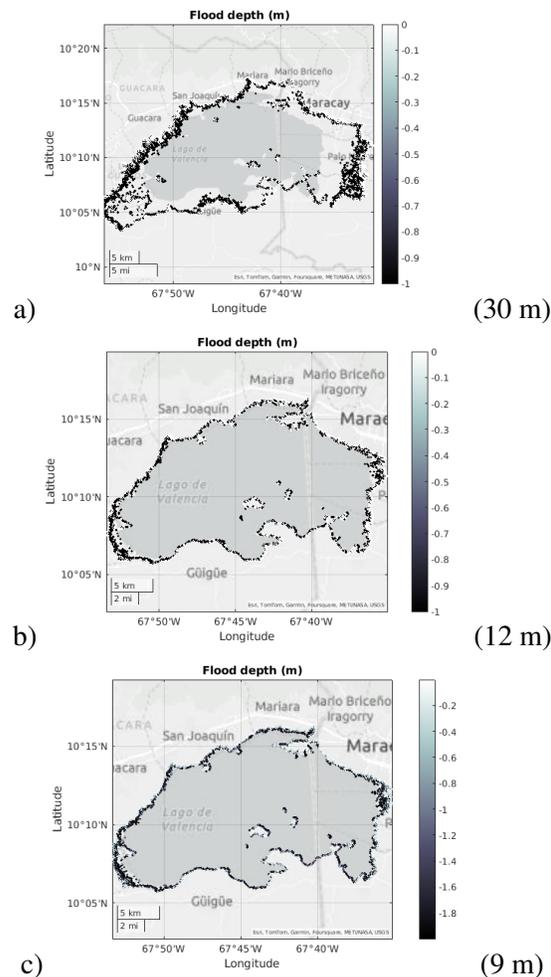


Figura 14. Simulación de expansión. Fuente Propia

La simulación a 12 m se ajusta mucho mejor al borde actual del lago y se evidencia que las zonas inundadas se corresponde con aquellas zonas que históricamente han sido afectadas por la expansión del lago, sin embargo la expansión del lago aún se ve sobre estimada en las zonas este y oeste .

La simulación a 9 m se ajusta aun mejor al borde del lago y la expansión del mismo no se nota tan agresiva como en las simulaciones anteriores, esto se evidencia en las zonas Este (Aragua) y Oeste (Carabobo) del lago.

A pesar de que el uso de un DEM de alta resolución involucra una cantidad considerable de cálculos, la expansión del lago se ve mejor reflejada en con un DEM de 9 m que con los de 12 m o 30 m.

En la figura 15 se han realizado acercamientos a dos áreas específicas para comparar el nivel de detalle y

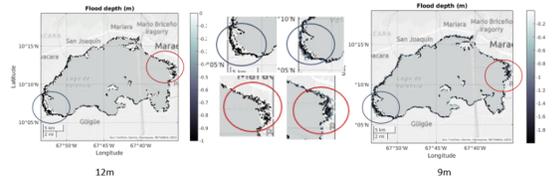


Figura 15. Diferencias entre simulaciones. Fuente: Propia

las diferencias entre las simulaciones. Se observan diferencias significativas en la extensión de la inundación simulada, especialmente al contrastar el Modelo Digital de Elevación (DEM) de 12 metros con el de 9 metros. Un análisis detallado de los acercamientos permite identificar una sobreestimación de la inundación más pronunciada en la simulación realizada con el DEM de 12 metros. Por lo antes descrito se decidió trabajar con el modelo de 9 metros, ya que muestra menor sobre estimación de la inundación en las áreas susceptibles a ser inundadas.

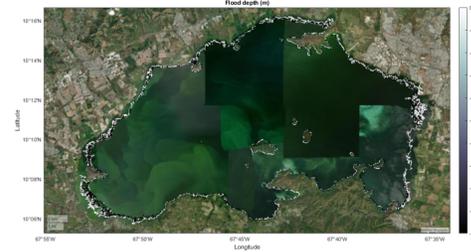
3.5 Simulaciones de expansión y comparación con eventos extremos

Las constantes crecidas desde el año 2005 aumentaron el nivel del lago y superaron las capacidades de evaporación y purificación de sus aguas. Dichas crecidas se debieron a los transvases de agua de la cuenca del Orinoco a la cuenca del Lago de Valencia para el consumo de agua potable de la densa población de la mayor parte de los estados Aragua y Carabobo (por ejemplo, los embalses de Cachinche y La Balsa sobre el río Pao), que han contribuido al aumento de nivel del lago, que recoge a su vez las aguas servidas a través de numerosos ríos como el Cabriales, Güey, Aragua y otros.

Por esta razón se seleccionó el año 2005 para realizar una simulación de la expansión del lago y compararla con la imagen satelital del lago correspondiente al mes de octubre, obtenida desde [2]. Para la simulación se utilizó el nivel de agua de 410 msnm y MatFlood. La imágenes se muestran en la figura 16.

En la imagen 16 se observa la expansión superpuesta sobre una imagen satelital actual del lago, en ella resalta el hecho de que en el año 2005, la isla de la culebra aún no era una isla, esto se puede ver en la parte inferior izquierda de la simulación.

Para evaluar las diferencias entre la expansión simu-



Simulación 2005 nivel 410 msnm.



Imagen Satelital Octubre 2005.

Figura 16. Simulación vs Imagen satelital año 2005. Fuente: Propia

lada y la expansión histórica del Lago de Valencia, se procesaron ambas imágenes satelitales en el software QGIS [5]. Inicialmente, las imágenes fueron alineadas dentro de una ventana geográfica delimitada por las coordenadas de longitud mínima (-67.9) y máxima (-67.5), y latitud mínima (10.05) y máxima (10.31), asegurando así una superposición espacial precisa. Posteriormente, se procedió a delimitar manualmente los bordes de la expansión simulada y la expansión histórica observada en la imagen satelital. Finalmente, mediante las herramientas de análisis espacial de QGIS, se realizó la operación de resta entre las áreas delimitadas para calcular el área de la diferencia, cuantificando así la discrepancia entre la simulación y la realidad observada. El resultado se muestra en la figura 17 en la que se observa que la simulación sobre estima la expansión real (area rosada).

Sobre estimación 2005: 15 km^2

$$(1 - \text{Área inundada} / \text{Área simulada}) * 100 = (1 - (389/374)) * 100 \approx 4 \%$$

$$\text{Perímetro del lago simulado} - \text{Perímetro inundado} = 159,67 - 127 = 32,67 \text{ km}$$

El segundo año que se consideró para realizar la expansión y comparar con la imagen satelital fue 2012, debido a que en este año las precipitaciones afectaron

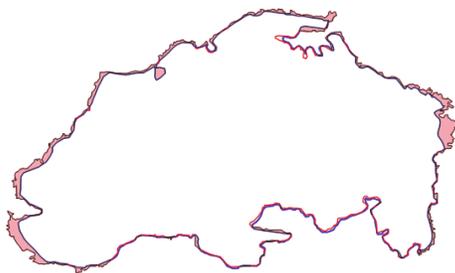
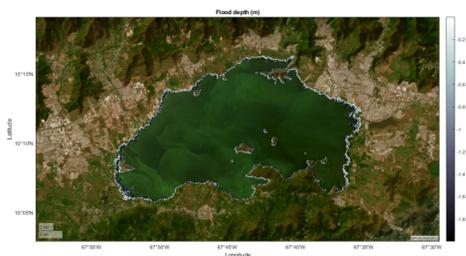


Figura 17. Diferencias entre simulación y expansión real año 2005. Fuente: Propia

el nivel del lago.

“En el año 2012 se produjo una emergencia, cuando el Lago de Valencia experimentó niveles importantes de crecimiento y se elevó a 413,36 msnm la cota máxima de seguridad. [6]”

“En 2012, las lluvias y el desnivel entre los caseríos y el lago, provocaron inundaciones y filtraciones de estas aguas contaminadas que afectaron a más de 8.500 personas que terminaron en refugios improvisados en unidades militares de Aragua, en hoteles, en escuelas y en otras instituciones educativas. Muchas familias pasaron hasta 7 años en los refugios, unas pocas fueron indemnizadas con viviendas y el barrio El Aguacatal fue declarado refugio abierto” [6].



Simulación 2012 nivel 412.5 msnm.

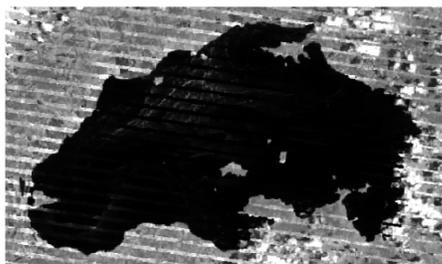


Imagen Satelital Octubre 2012.

Figura 18. Simulación vs Imagen satelital año 2012. Fuente: Propia

Se repitió el proceso realizado con la simulación de



Figura 19. Diferencias entre simulación y expansión real año 2012. Fuente: Propia

2005 para evaluar las diferencias entre la expansión simulada y la expansión histórica del Lago de Valencia en 2012, se procesaron ambas imágenes satelitales en el software QGIS. se alinearon las imágenes dentro de una ventana geográfica delimitada por las coordenadas de longitud mínima (-67.9) y máxima (-67.5), y latitud mínima (10.05) y máxima (10.31), se procedió a delimitar manualmente los bordes de la expansión simulada y la expansión histórica observada en la imagen satelital. Finalmente, mediante las herramientas de análisis espacial de QGIS, se realizó la operación de resta entre las áreas delimitadas para calcular el área de la diferencia, cuantificando así la discrepancia entre la simulación y la realidad observada. El resultado se muestra en la Figura 19 en la que se observa nuevamente que la simulación sobreestima la expansión real (área verde).

Sobre estimación 2012: Sobreestimación 13 km^2
 $(1 - \frac{\text{Área inundada}}{\text{Área simulada}}) * 100 =$
 $(1 - (419/406)) * 100 \approx 3\%$
 Perímetro del lago simulado-Perímetro inundado = $211 - 46,7 = 64,3 \text{ km}$

En la simulación de 2012, se observa siguiendo la simulación de la expansión, que MatFlood ya considera al área de la culebra como una isla, cuando en realidad en 2012 no se había sido rodeada la zona por el agua.

Dado que en ambos años se observa una sobreestimación de la inundación se considera necesario el uso del factor de reducción de Matflood. De esta manera se disminuirá este efecto logrando así que las simulaciones se ajusten más a la realidad observada, permitiendo de esta manera realizar simulaciones más precisas y permitiendo la correcta identificación de las áreas propensas a sufrir por la expansión del

lago.

4. Conclusiones

En este trabajo se llevaron a cabo simulaciones de los cambios morfológicos en el borde del lago, asociados a las variaciones en los niveles del agua.

- Se utilizaron tres Modelos Digitales de Elevación con distintas resoluciones, 30 m, 12 m y 9 m, determinando que el DEM de 9 m proporciona una representación mucho más precisa de la expansión del lago en comparación con los DEM de 30 m y 12 m.
- Se modeló la expansión del Lago de Valencia combinando la herramienta MatFlood junto con un DEM de alta resolución (9 metros) y un nivel de agua en el lago, proporcionando resultados que se ajustan a la realidad observada y permitiendo la identificación de las áreas susceptibles a inundaciones.
- La comparación directa entre las simulaciones y las imágenes satelitales procesadas en QGIS permitió cuantificar la discrepancia entre la expansión simulada y la expansión histórica. Este análisis reveló que el DEM de 9 metros provee una mejor representación de la realidad y se redujo la sobreestimación.
- Surge la necesidad de determinar y aplicar un factor de reducción en las simulaciones para ajustar mejor los resultados a la realidad observada. Al calibrar el modelo con el factor de reducción correcto, se logrará minimizar la sobreestimación de la inundación y obtener una representación más precisa de la extensión del agua, lo que subraya la importancia de la calibración en la modelización de inundaciones.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el FONACIT bajo la subvención 2024PGP142.

Referencias

- [1] Enriquez, A. (2023). "MatFlood: An efficient algorithm for mapping flood extent and depth".

Environmental Modelling and Software. Vol. 169, N°105829.

- [2] U.S. Geological Survey. *Earth Explorer*, <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- [3] EOS Data Analytics. *Satellite Images on EOSDA LandViewer*. <https://eos.com/landviewer/>
- [4] Morasutti, G. (2019). "Proyecto Integral de Soluciones Definitivas del Lago de Valencia y Obras Complementarias". <https://grupoorinoco.org/wp-content/uploads/2019/03/presentaciocc81n-ca-ceiedc.pdf>
- [5] Sherman, Gary E and Sutton, Tim and Blazek, Radim and Luthman, Lars. (2004). "Quantum gis user guide"
- [6] Díaz Gregoria. (2017). "Lago de Valencia amenaza 17 comunidades al sur de Maracay". *Crónica Uno*. <https://goo.su/OBkNd>