

Zonas susceptibles y de peligrosidad a inundaciones por lluvias intensas en la cuenca Chávez

Rolando Darío Cárdenas-Puentes (^{1*}), Msc. Jorge Olivera-Acosta (¹)

^{1*} Instituto de Geofísica y Astronomía, la Habana, Cuba. Email: cardenaspuentesrolandodario@gmail.com

Recibido: octubre 2024	Aceptado: diciembre 2024
------------------------	--------------------------

Resumen

La investigación se realizó a partir de la propuesta metodológica en la que se tuvieron en cuenta, en una primera etapa, el empleo de los factores condicionantes (indicadores hidromorfológicos), obtenidos directamente del análisis del relieve con el uso de un Modelo Digital del Terreno (MDT), los cuales mediante el álgebra de mapas y su integración en un Sistema de Información Geográfico (SIG), definen el área geomorfológicamente inundable (zonas susceptibles), y en una segunda etapa, para definir el carácter peligroso de la inundación dentro de las zonas susceptibles. Para ello, se utilizó el producto de las variables hidráulicas (calado y velocidad de flujo), obtenidas mediante el proceso de simulación hidráulica soportado sobre un (SIG), considerando la intensidad máxima histórica de la lluvia ocurrida en la cuenca Chávez. Como resultados fundamentales de la investigación, se obtuvo la delimitación espacial de las zonas potencialmente inundables (zonas susceptibles) y las áreas inundadas donde las mismas pueden adquirir un carácter peligroso, poniendo en riesgo los bienes y las vidas de las personas que habitan y desarrollan su actividad en dicha cuenca. Estos resultados contribuyen a la actualización de los planes de reducción de riesgos de desastres y a la mejor planificación del territorio, convirtiéndose en una herramienta de consulta indispensables en manos de los decisores en los territorios que abarcan dicha cuenca.

Palabras claves: cuenca, inundación, lluvia, peligro, peligrosidad

Susceptible and dangerous areas to flooding due to heavy rains in the Chávez basin

Abstract

The research was carried out based on the methodological proposal that took into account, in a first stage, the use of conditioning factors (hydromorphometric indicators), obtained directly from the analysis of the relief using a digital terrain model (DTM), which through map algebra and its integration into a geographic information system (GIS), define the geomorphologically floodable area (susceptible zones), and in a second stage, to define the dangerous character of the flood within the susceptible zones. For this, the product of the hydraulic variables (draft and flow rate) was used, obtained through the hydraulic simulation process supported on a (GIS), considering the maximum historical intensity of the rain that occurred in the Chávez basin. As fundamental results of the research, the spatial delimitation of the potentially floodable zones (susceptible zones) and the flooded areas where they can acquire a dangerous character, putting at risk the property and lives of the people who live and carry out their activity in said basin. These results contribute to the updating of disaster risk reduction plans and to better territorial planning, becoming an indispensable consultation tool in the hands of decision-makers in the territories that comprise the basin.

Keywords: Basin, Flood, Hazard, Hazardousness, Rain

1. INTRODUCCIÓN

Entre los diversos tipos de desastres naturales que ocurren en el mundo actual sobresalen los ocasionados por las inundaciones como uno de los más recurrentes a nivel global.

Una inundación es la ocupación por parte del agua de zonas que habitualmente están libres de esta, por desbordamiento de ríos, torrentes o ramblas, por lluvias torrenciales, deshielo, por subida de las mareas por encima del nivel habitual, por maremotos, huracanes, entre otros. (Diccionario de la Lengua Española, 2014).

Las inundaciones fluviales son procesos naturales que se han producido periódicamente y que han sido la causa de la formación de las llanuras en los valles de los ríos. Son el efecto generado por el flujo de una corriente cuando sobrepasa las condiciones que le son normales y alcanza niveles extraordinarios que no pueden ser controlados en los vasos naturales o artificiales que la contienen, lo cual deriva ordinariamente en daños que las aguas desbordadas ocasionan en zonas urbanas, tierras productivas y en general en valles y sitios bajos. Atendiendo a los lugares donde se producen las inundaciones pueden ser: costeras, fluviales, lacustres y pluviales según se registren en las costas marítimas, en las zonas aledañas a las márgenes de los ríos y lagos y en terrenos de topografía llana a causa de las lluvias excesivas y a la inexistencia o defecto del sistema de drenaje respectivamente. Los niveles de inundación dependen no sólo de las precipitaciones sino del grado de saturación que tiene el suelo y los días que lleva lloviendo (Anon., 2002)

Como causas antrópicas que provocan el incremento de estas inundaciones podemos citar, las inadecuadas transformaciones del terreno causando modificaciones y obstrucción del drenaje natural, impermeabilidad natural de los suelos, procesos de urbanización que traen consigo la creación de superficies impermeables, como techos y calles, las cuales impiden la infiltración del agua ocasionando que una alta proporción de la precipitación se transforme en escurrimientos y muchos de los drenajes se obstruyan frecuentemente por esta causa y por la mala conducta social en la deposición de los residuos sólidos urbanos e ineficiente gestión en la recogida de los mismos que en muchas ocasiones obstruyen esta red de alcantarillado.

Los efectos potenciales de las inundaciones dependen de varios factores, no sólo de factores meteorológicos, sino también de las características propias del terreno. Esta metodología para el cálculo del peligro de inundación determina primeramente los factores condicionantes de la inundación, donde se identifica el escenario de peligro, que caracteriza el alcance y la magnitud de la amenaza a partir de los indicadores, fundamentalmente de origen geomorfológico que determinan la susceptibilidad del terreno propenso a inundarse (peligro potencial). En una segunda etapa, se evalúa el impacto dentro del escenario de peligro a partir de los factores desencadenantes que originan la inundación, entre los que se encuentran como elemento o factor de disparo, la intensidad de las precipitaciones en un corto período de tiempo, las cuales provocan inundaciones de carácter súbito o inundaciones dinámicas con crecidas repentinas, donde los indicadores que determinan su peligrosidad se evalúan a partir de las magnitudes hidráulicas calado y velocidad de flujo de avenida.

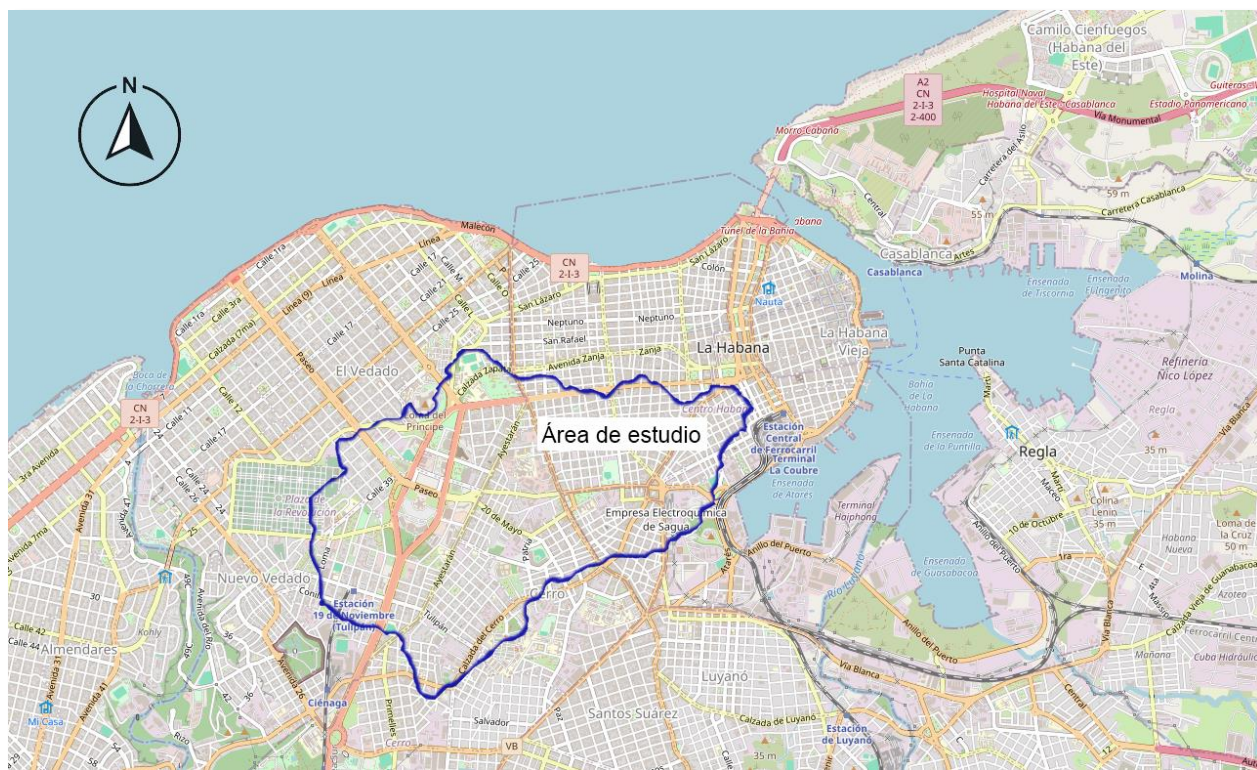


Fig. 1: Esquema de localización del área de estudio.

El trabajo de investigación que se desarrolla para esta cuenca (Figura 1: Esquema de localización), constituye un aporte valioso tanto desde el punto de vista metodológico como de interés práctico, ya que el mismo sirve de apoyo a los estudios de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo (PVR) que vienen desarrollando los grupos del CITMA en cada provincia y el Grupo Nacional de Evaluación de Riesgos de Desastres perteneciente al Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA). Los resultados que aporta esta investigación permitirán obtener de forma más exacta las áreas afectadas por las inundaciones fluviales recurrentes en esta cuenca y evaluar su peligrosidad, a la que están expuestos los diferentes componentes del medio físico y socioeconómico presentes en ella, contribuyendo a la actualización de los planes de riesgos de desastres en la provincia de La Habana. Desde el punto de vista metodológico, constituye un aporte significativo para los estudios de PVR con un nuevo enfoque, empleando nuevos índices hidrológicos, hidráulicos y morfométricos derivados del uso de los modelos digitales del terreno (MDT) implementados dentro de los algoritmos y las herramientas de la hidrología computacional, soportados sobre tecnología SIG.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgos de inundación por intensas lluvias se utilizaron los siguientes materiales.

2.1. Materiales

- Mapas cartográficos de inundaciones, realizados con anterioridad en la cuenca de estudio.
- Mapa ráster de láminas de lluvia para 24 horas y 1 hora correspondientes a una probabilidad de ocurrencia de 1% en la cuenca de estudio.
- Registro histórico de datos sobre intensidad de las precipitaciones sobre las cuencas de estudio.
- Cotas y curvas de nivel topográficas digitalizadas de las hojas cartográficas 1: 25 000 de las regiones de La Habana: Plaza de la Revolución, Centro Habana, Habana Vieja y Cerro (Geocuba, 2021).
- Modelo digital de elevación del terreno (MDT) con celdas iguales o inferiores a 5m por pixel, generado a partir de las cotas y curvas de nivel.
- Mapas planimétricos de localidades, poblados, infraestructuras y viales expuestos en zona de peligro de inundación, descargados de la base de datos cartográfica (Open Strep Map(OSM), 2024).

- Mapa con el límite de los municipios y los consejos populares. (Instituto Nacional de Ordenamiento Territorial y Urbanístico (INOTU), 2023).
- Soporte computacional para el procesamiento de la información espacial.
- Sistema de información geográfica de código libre SAGA (versión 9.4).

2.2. Métodos de nivel práctico

La metodología empleada para la presente investigación se fundamenta en los nuevos lineamientos metodológicos a partir de la incorporación de nuevos algoritmos y tecnologías de información en soporte SIG de código libre (Olivera J., 2023). En la Figura 2 se muestra un esquema en el cual se describe paso a paso la metodología empleada.

Factores condicionantes de la inundación. Determinación del escenario de peligro o zonas susceptibles a la inundación.

La determinación de las zonas susceptibles a ser inundadas (escenarios de peligros) se determinan a partir de factores hidromorfológicos derivados directamente del modelo digital del terreno (MDT). La metodología empleada para la determinación de las zonas susceptibles, se fundamenta en el rol que desempeña la topografía del relieve como factor principal en la conducción y acumulación del flujo de las aguas lo que favorece la ocurrencia de los peligros de inundación, (García Rivero., 2017). A partir de esta afirmación, se seleccionan y aplican los criterios geomorfológicos e hidrológicos, estos altamente dependientes del relieve, dichos parámetros se seleccionaron y calcularon empleando las herramientas del SIG SAGA en su versión 9.4.

Factores hidromorfológicos para el cálculo de las zonas susceptibles:

- Flujo acumulado modificado o *MCA* (del inglés *modified catchment area*).
- Índice topográfico de humedad o *TWI* (del inglés *topographic Wetness Index*).
- Esguerrimiento superficial u *OF* (del inglés *overland flow*).

Flujo acumulado Modificado (MCA)

El MCA se determina a partir de un algoritmo que se encuentra en el software SAGA en la herramienta de hidrología - índice de humedad de SAGA. El mismo se diferencia del flujo acumulado tradicional porque se basa en un cálculo del área de captación modificada, que no considera el flujo como una película muy delgada. Como resultado de esto, predice para las celdas situadas en el fondo de los valles con una pequeña distancia vertical medida desde un cauce, dando como resultado una humedad del suelo potencial más alta y acertada con la realidad que la que se obtiene con el cálculo estándar de TWI (Boehner J.K., 2002).

Índice topográfico de humedad (TWI)

Igual que el factor anterior para el cálculo de este indicador solo hay que tener como datos de entrada el modelo digital del terreno hidrológicamente corregido, se obtiene con la misma herramienta del índice de humedad de SAGA, es un subproducto de este indicador. EL TWI fue originalmente desarrollado para predecir las áreas saturadas y también para predecir la profundidad del nivel freático del suelo. Posteriormente ha sido empleado para predecir el contenido de humedad del suelo y para identificar áreas de erosión y /o deposición potencial de materiales, y para la predicción del desarrollo de cárcavas (Martínez Casanova J.A., 1999).

Esguerrimiento superficial (Overland flow)

Representa la lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje. Este se forma cuando las precipitaciones superan la capacidad de infiltración del suelo, por lo tanto, el agua esguerra y se acumula en lugares con condiciones favorables de anegamiento (OMM y ONU, 2012). Este factor o indicador se obtuvo a partir de la herramienta de simulación hidrológica del software SAGA GIS. Para el cálculo de este indicador se necesitan como datos de entrada los siguientes parámetros: MDT, coeficiente Manning-Stricker, capacidad de intercepción, capacidad de encharcamiento, capacidad de infiltración, intensidad de la precipitación, potencial de evapotranspiración, simulación del tiempo en horas.

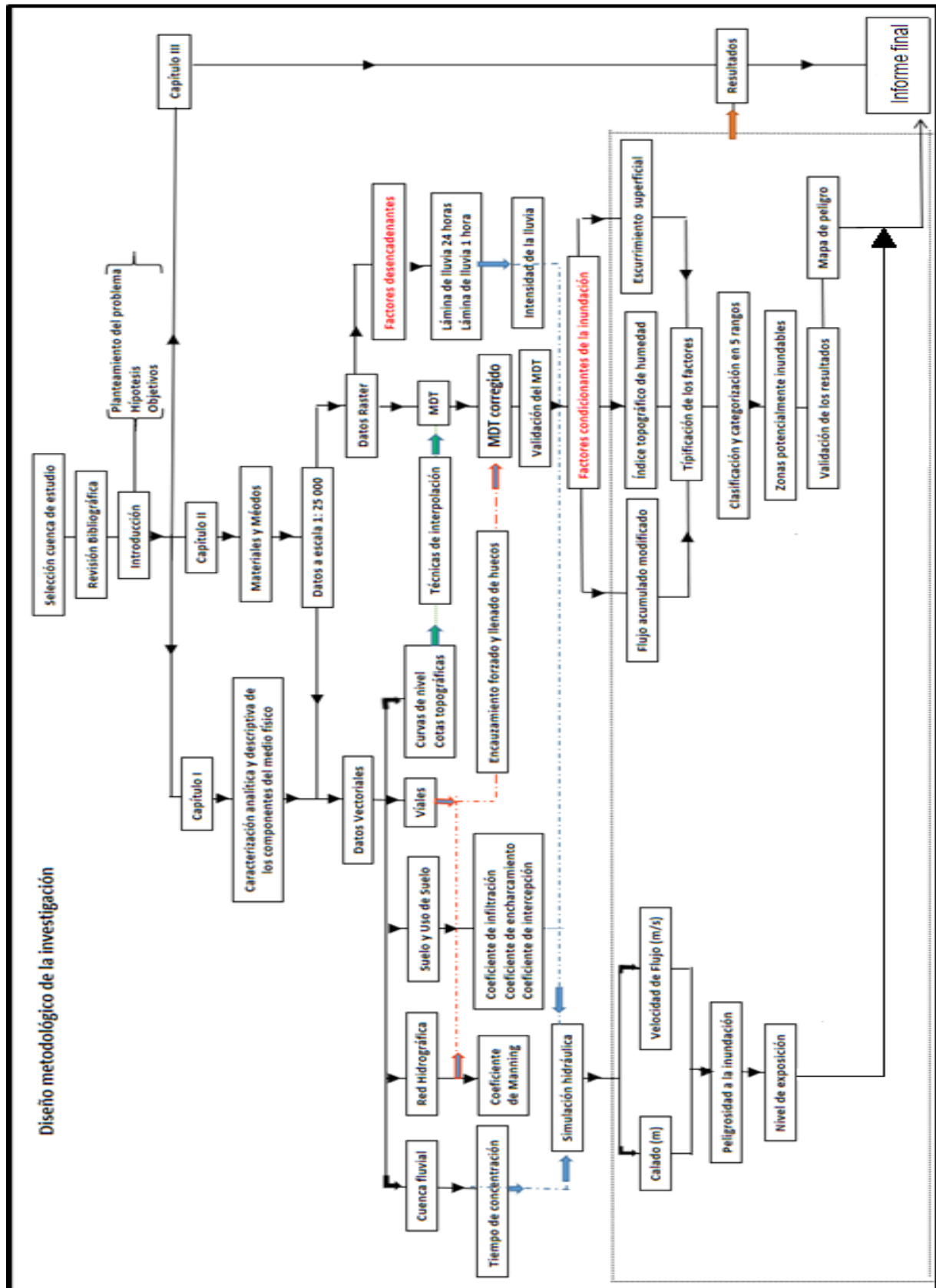


Fig. 2: Metodología empleada para la investigación. Imagen brindada por el Instituto de Geofísica y Astronomía.

Factores desencadenantes de la inundación. Determinación de la peligrosidad de la inundación y nivel de exposición de las infraestructuras.

Para un mejor análisis de las posibles afectaciones a las infraestructuras se determinó el mapa de la peligrosidad el cual representa la intensidad con la cual afecta la inundación a los diferentes componentes expuestos (principal impacto de las lluvias intensas) en las zonas de la cuenca. Para el cálculo de la peligrosidad a la inundación fue necesario contar con el tirante de agua o altura de la inundación y la velocidad del flujo de avenida de las aguas.

Intensidad de las precipitaciones.

Para elegir la intensidad de la precipitación que provoca los niveles de peligrosidad dentro del escenario de peligro, es necesario realizar el proceso de simulación hidráulica para la cuenca. En este caso, se toma el comportamiento histórico de la lluvia máxima registrada con probabilidad de ocurrencia del 1 %, con un período de retorno de 100 años.

Mediante el uso de la tabla de intensidad de las lluvias históricas para las cuencas fluviales de La Habana, basado en la tabla de intensidad, duración y frecuencia del Ing. Berdó Kochiashvili (Figura 3) se elige una intensidad de lluvia correspondiente al 1 % de probabilidad. Para el presente caso, la más cercana al evento máximo histórico ocurrido fue de 133 mm/h. Los gráficos y tablas aparecen citadas en Batista J. Luis. 2021 “Hidrología práctica”.

Tirante o altura del agua de inundación.

Su cálculo se basó fundamentalmente en los registros de lluvias históricas en la cuenca. El análisis de este registro permitió definir la intensidad de la lluvia para simular el proceso del escurrimiento, en el cual se consideró una intensidad de lluvia con un período de retorno para 100 años y a partir de ella, calcular cuál va a ser el tirante o altura de agua que va a afectar a las infraestructuras expuestas y considerar si realmente esas estructuras expuestas presentan condiciones de peligro ante la inundación.

Velocidad del flujo de las aguas.

Sin dudas constituye un parámetro hidráulico importante a considerar, pues uno de los impactos que trae consigo asociados a este indicador es el de la erosión, el arrastre de enormes cantidades de sedimentos y el acarreo de proyectiles (piedras y empalizadas) que su impacto contra las estructuras y obras de fábrica pueden hacer colapsar las mismas y causar enormes daños incrementando los riesgos por inundación.

El producto combinado del factor tirante de agua y la velocidad del flujo a partir de las condiciones implementadas en laboratorios de hidráulicas ante la resistencia de materiales, da como resultado la identificación del nivel de peligrosidad de las distintas zonas afectadas a consecuencia de inundación por lluvias intensas.

Cálculo de las afectaciones a bienes e infraestructuras expuestas a la inundación.

Una vez calculada la peligrosidad, se determinaron los elementos expuestos al peligro de inundación y, posteriormente, se realizó una evaluación de su vulnerabilidad. Como elementos expuestos en la cuenca de estudio, se consideraron las infraestructuras (vulnerabilidad estructural) y viales (no estructural).

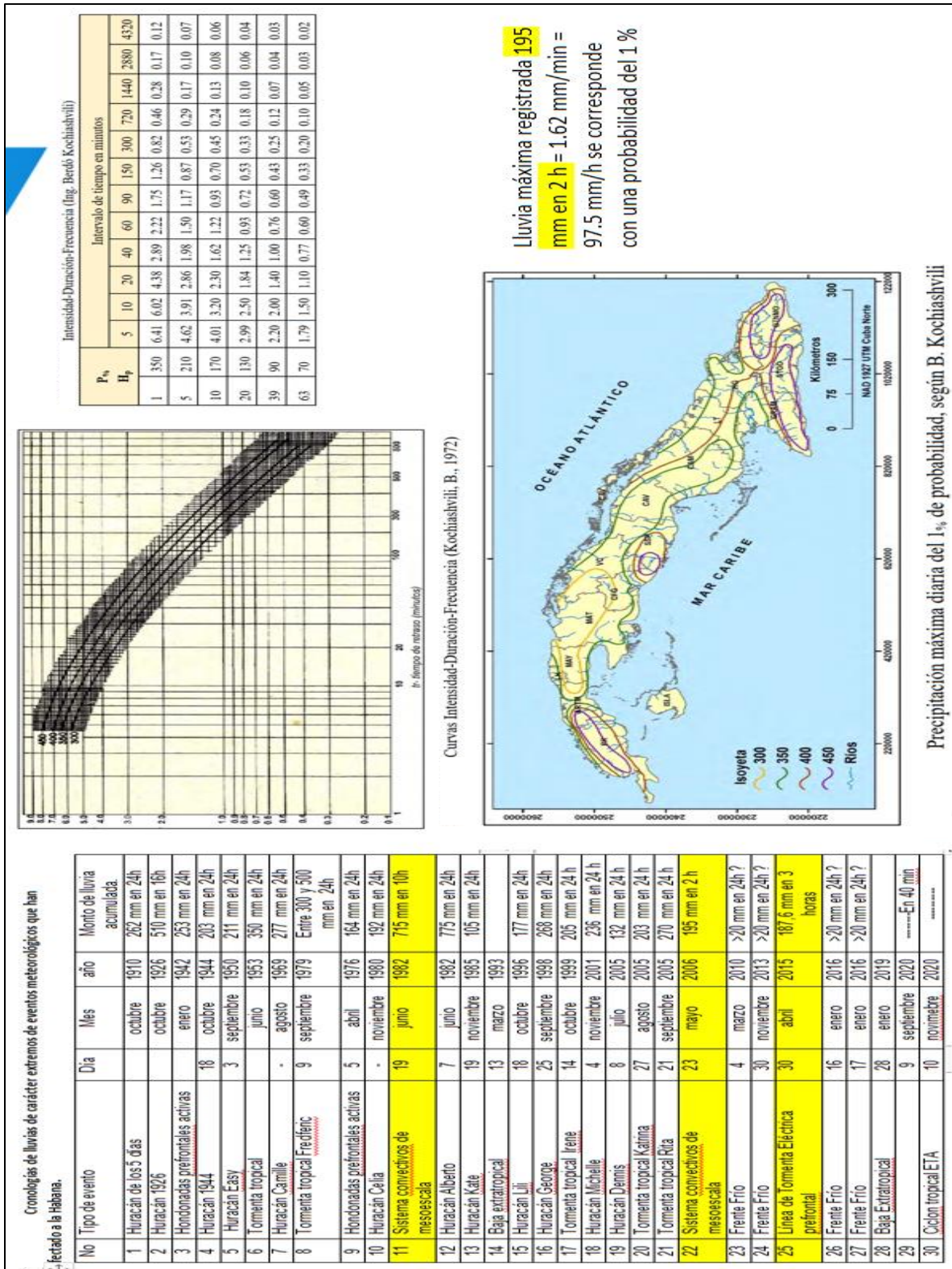


Fig. 3: Selección de la intensidad máxima de lluvias para una probabilidad dada. Imagen obtenida de la metodología de inundación por lluvias extremas. ((IGA), 2023)

3. RESULTADOS

Mapa de peligro potencial de inundabilidad.

Cabe destacar que este mapa (Figura 4), representa las zonas con mayor peligro producto de una lluvia extrema, teniendo en cuenta fundamentalmente la morfología del relieve de la cuenca lo que da como resultado la magnitud máxima del evento o máxima área potencial de la inundación. El color azul intenso en el mapa representa los territorios con mayor peligro, el resto de tonalidades representan su nivel de exposición teniendo en cuenta la línea coherente de degradación del color azul hasta llegar al color blanco, los cuales son los territorios con un nivel sin peligro de inundación.

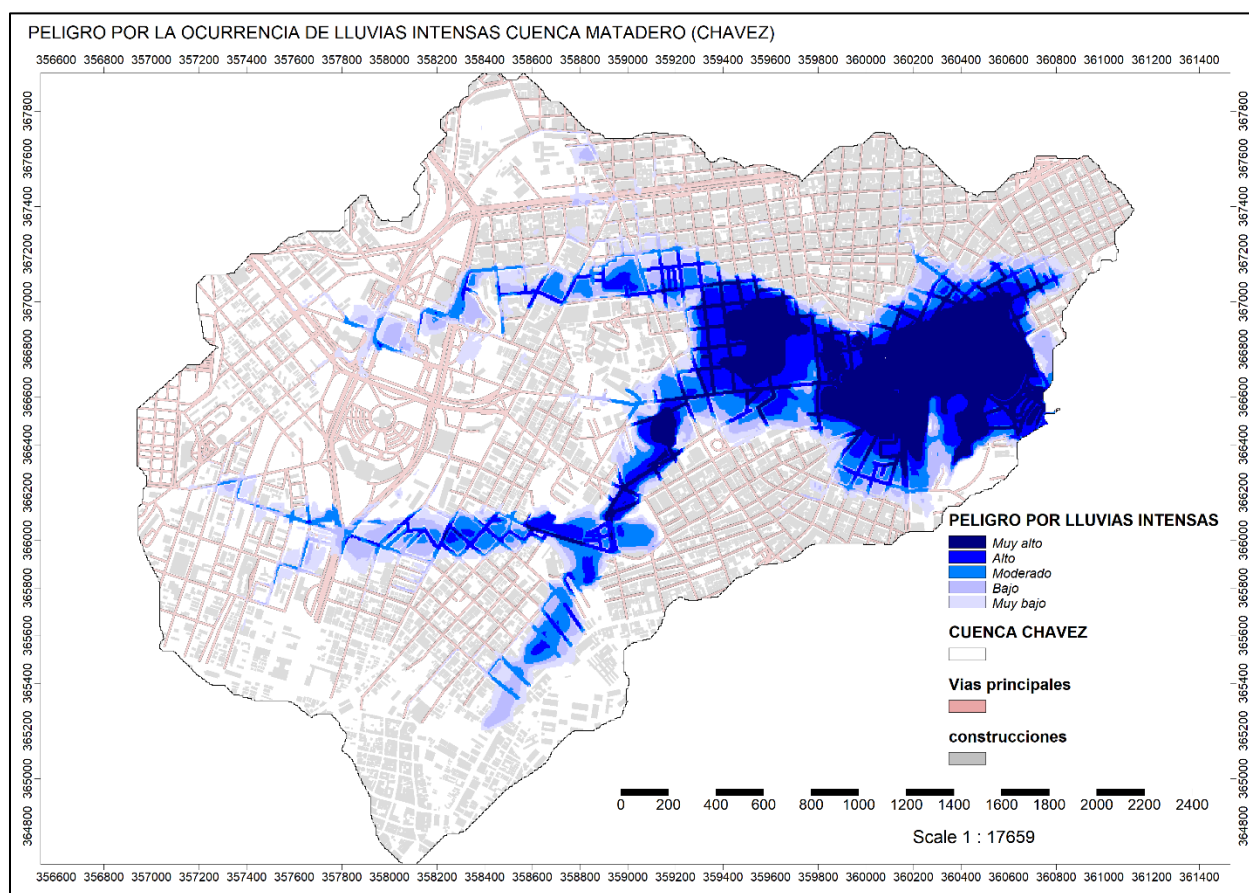


Fig. 4: Zonas potencialmente peligrosas por inundación producto a la ocurrencia de lluvias intensas dentro de la cuenca Chávez.

Peligrosidad a la inundación dentro de las zonas susceptibles.

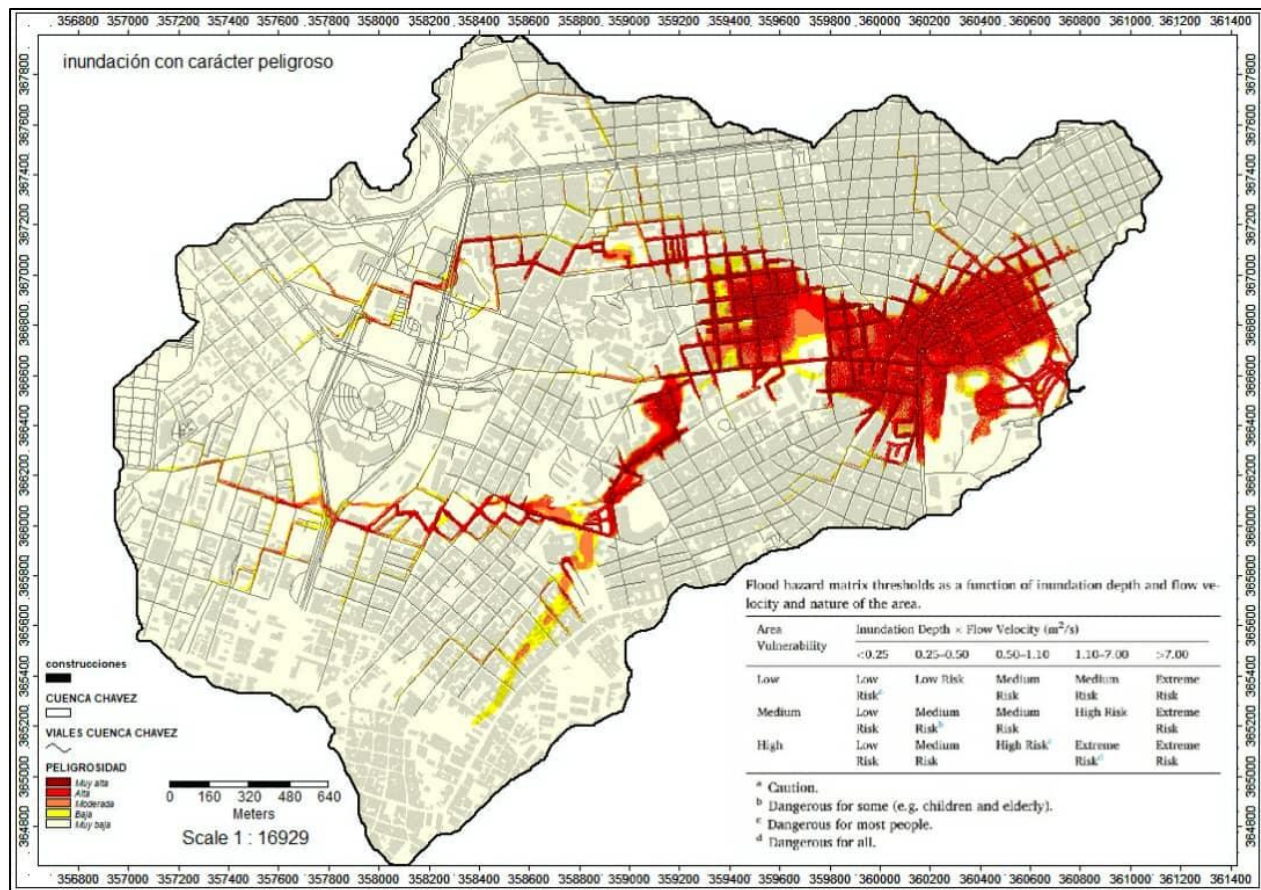


Fig. 5: Peligrosidad de las zonas afectadas por la inundación en la Cuenca Chávez. (SAGA, 2024)

Nivel de exposición de las infraestructuras a la peligrosidad.

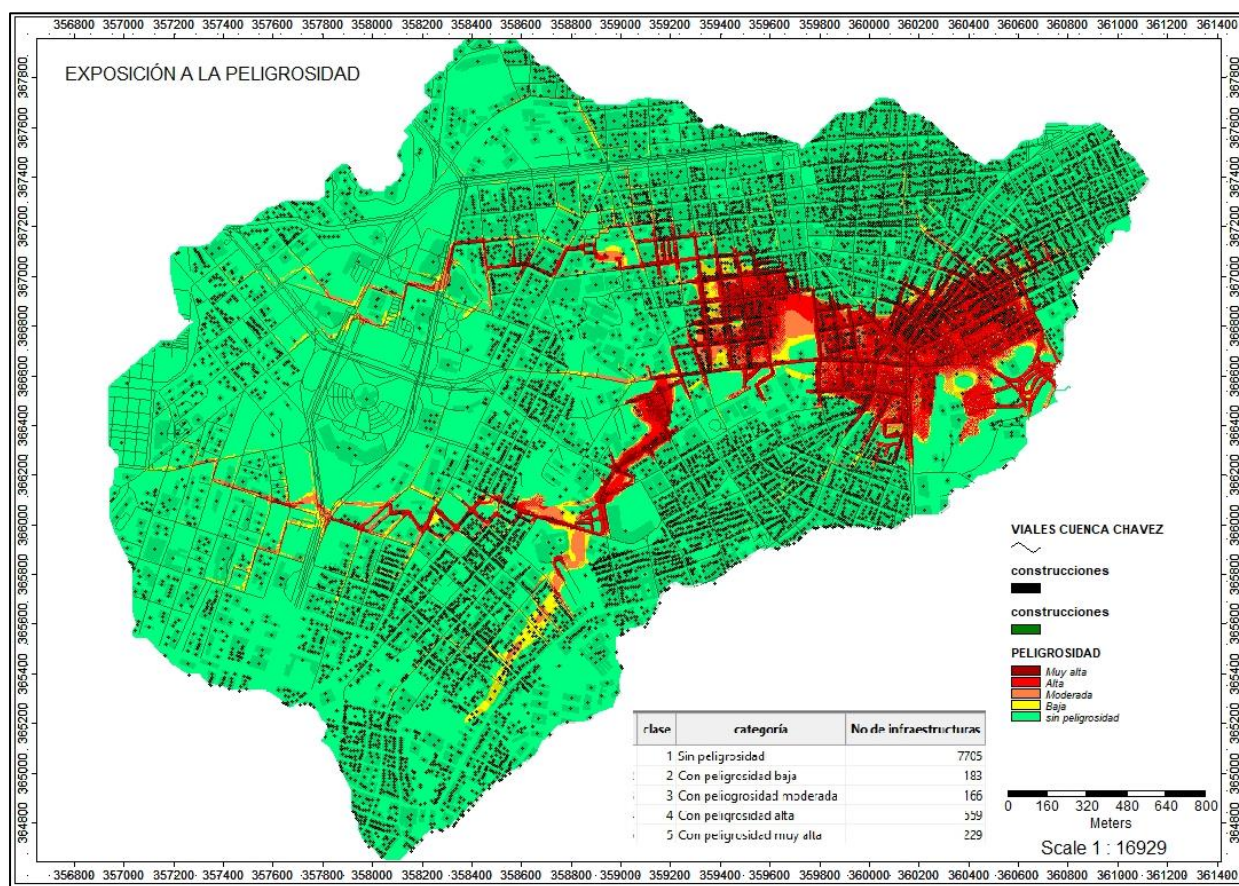


Fig. 6: Exposición de las infraestructuras a la peligrosidad. (SAGA, 2024)

3.1. Comprobación de resultados.

En la figura 7 se muestra la sección de estudio de un mapa original de La Habana de 1875. Es un documento histórico valioso, ya que proporciona información detallada sobre la ciudad en aquel entonces. En este, se observa la existencia del antiguo arroyo Chávez y varios afluentes de dicho arroyo (resaltado en el mapa en color azul). Estos afluentes ayudaban a aumentar su caudal y mantenerlo fluyendo todo el año. El agua de este arroyo pasaba por el matadero ubicado en las cercanías y arrastraba consigo todos los restos del ganado que allí se sacrificaba, lo que daba a las aguas un color rojizo unido a un olor nada agradable. Al arroyo también se le decía de Chávez, por el nombre del puente, y poéticamente algunos intelectuales se referían a él como el purpurino de Chávez. Entre 1796 y 1799, a iniciativa del Real Consulado, se reconstruyó de mampostería. Tras ser canalizado totalmente en el siglo XVIII, el puente perdió su función y fue retirado. (Rodríguez Marciano, 2019)



Fig. 7: Sección de estudio tomada del mapa de La Habana del 1875 ubicada en los anexos.

Como resultado de la investigación y comprobación de los datos obtenidos mediante el uso del SIG y el mapa de la figura 7, se demostró que el escurrimiento superficial de la zona, sigue el mismo comportamiento hidrológico corresponde al cauce original de las principales corrientes fluviales de la cuenca en el siglo XIX. Con la diferencia del encauzamiento forzado producto de la existencia de calles e infraestructuras en la actualidad.

En la figura 9 se puede observar (puntos rosas) las ubicaciones en las que se comprobaron los resultados obtenidos mediante registros de fotos tomadas en el lugar, a modo de validación de los mismos. En estos puntos, los niveles de agua producto de la inundación, tienen un alto grado de correlación con los resultados de los mapas digitales, por lo que se demuestra la peligrosidad con la que impactan estos eventos extremos, los cuales provocan tanto afectaciones a las vidas y a la economía de los ciudadanos, como a la economía de la provincia de La Habana.

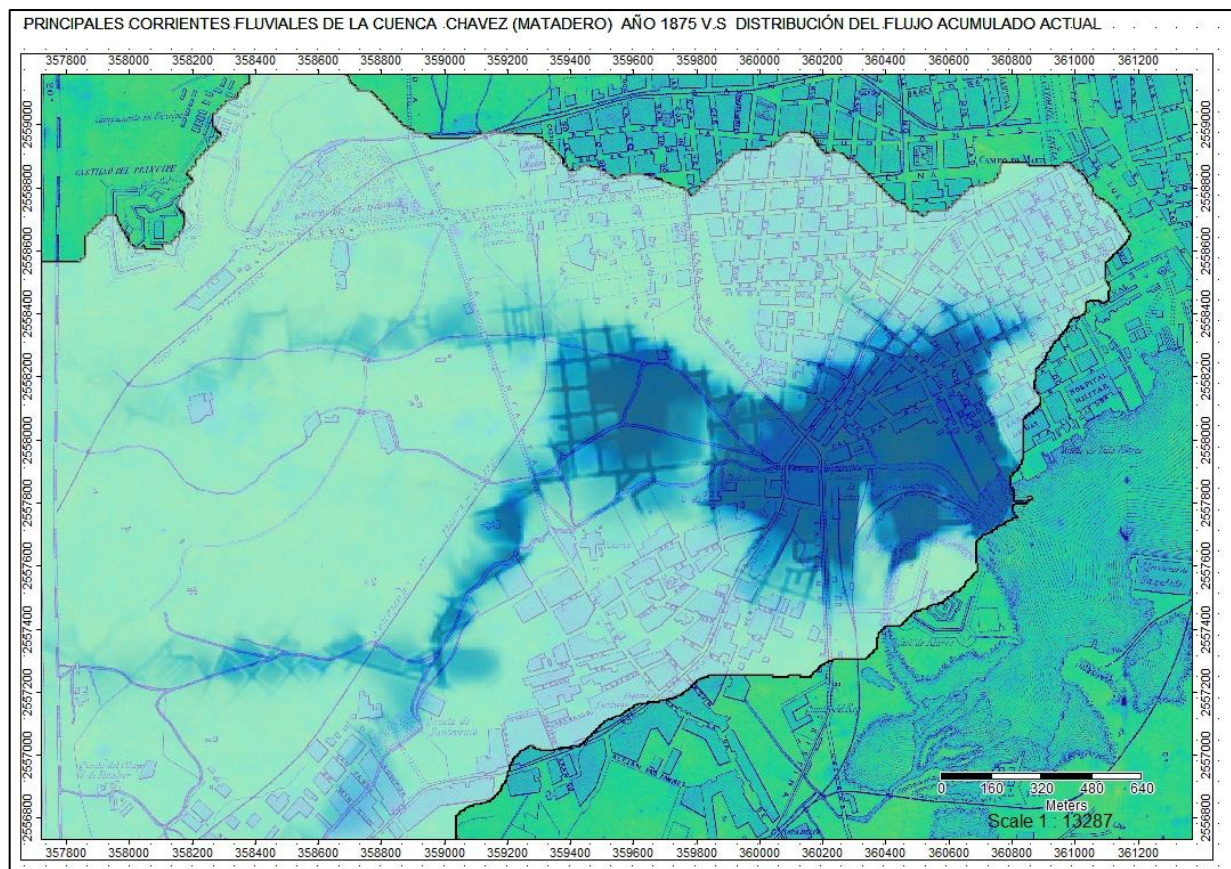


Fig. 8: Límites de la Cuenca Chávez en el mapa de La Habana del año 1875. (SAGA, 2024)

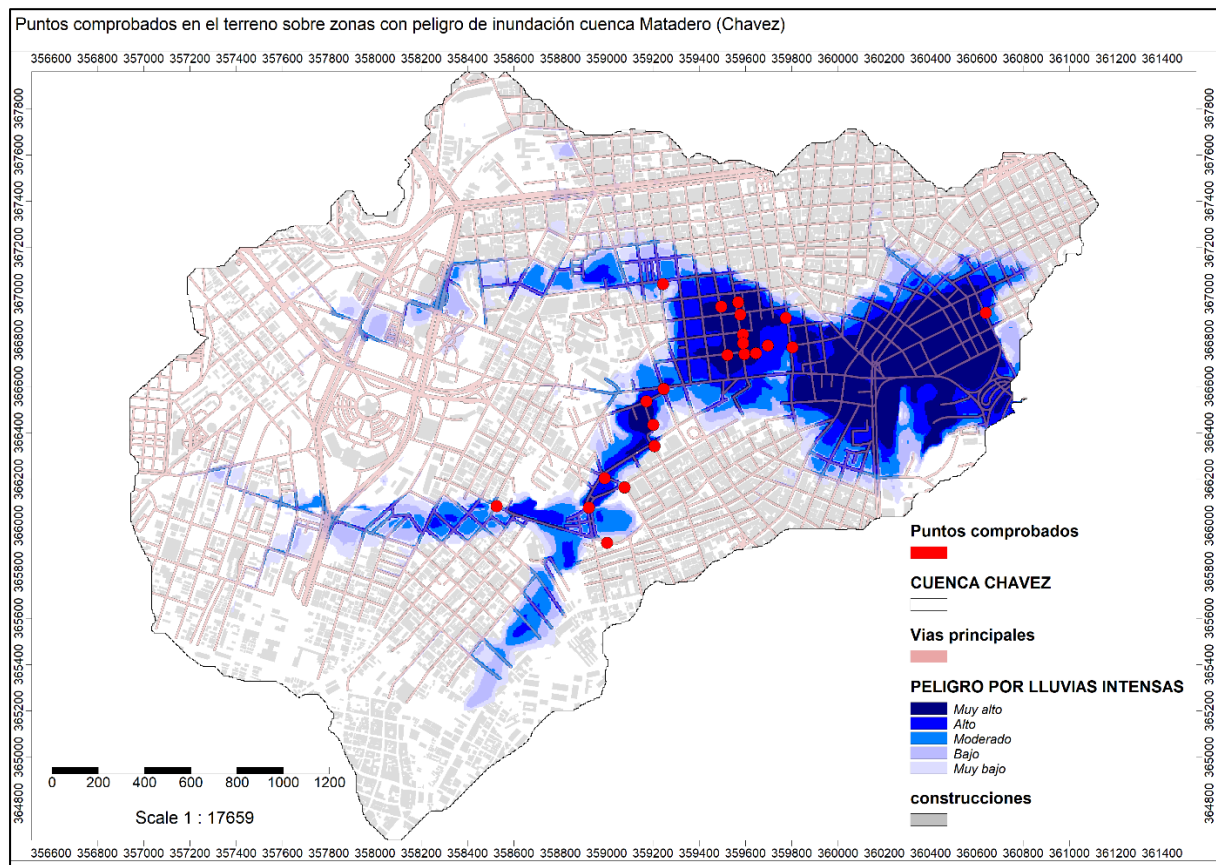


Fig. 9: Puntos validados a partir de registros de fotos de las inundaciones. (SAGA, 2024)

3.2. Principales causas de las inundaciones en cuenca Chávez o Arroyo Matadero.

1. El incremento de áreas urbanizadas con el consiguiente incremento de áreas impermeabilizadas, lo cual provoca una disminución de la infiltración y un aumento del escurrimiento superficial.
2. La densificación de la red vial, además de la impermeabilización del área ocupada por las vías provoca un incremento en la velocidad del escurrimiento, produciéndose en cortos espacios de tiempo la acumulación de grandes volúmenes de agua, imposibles de evacuar en zonas con deficiencias del sistema de drenaje del alcantarillado o inexistencia del mismo.
3. El uso inadecuado de corrientes superficiales al utilizarse los ríos y arroyos como vertederos de basuras, escombros y otros residuos sólidos por parte de la población y algunos organismos estatales provocando azolvamiento y obstrucciones del cauce.
4. Las prácticas inadecuadas en el manejo de los suelos y la deforestación de las franjas hidrorreguladoras de las corrientes fluviales inducen el incremento de los procesos erosivos y el aporte de sedimentos a los cursos de agua.
5. La indisciplina urbanística y la falta de control territorial por parte de las instituciones competentes propician la construcción de viviendas en zonas inundables.

4. CONCLUSIONES

La evaluación del nivel de exposición a las inundaciones de diferentes componentes o elementos presentes en la cuenca Chávez, como viviendas e infraestructuras, es un aspecto vital para comprender el impacto potencial de las inundaciones. Este análisis permite priorizar las acciones de prevención y respuesta ante eventos de inundación, minimizando las pérdidas humanas y materiales ante estos fenómenos naturales.

La elaboración de estos mapas y análisis constituyen un paso fundamental para la gestión integral del riesgo de inundación en la cuenca Chávez o Arroyo Matadero. La combinación de datos sobre susceptibilidad y peligrosidad permiten identificar las zonas más vulnerables y desarrollar estrategias de mitigación y preparación eficaces.

Es importante destacar que la gestión de riesgo de inundación requiere un enfoque participativo e interactivo, implicando a las comunidades locales, a las autoridades competentes y las instituciones científicas.

- Se elaboró el mapa de susceptibilidad a inundaciones fluviales en la cuenca Chávez utilizando los factores hidromorfométricos: fujo acumulado modificado, índice topográfico de humedad y escurrimiento superficial.
- Se confeccionó el mapa de peligrosidad a la inundación fluvial con la ayuda del *software* SAGA.
- Se realizaron mapas de nivel de exposición a las inundaciones de los elementos que constituyen escenarios de peligro.
- Se comprobó la similitud del comportamiento hidráulico de la cuenca, en la actualidad con la antigua existencia de un cauce fluvial en el territorio.

Se contrastaron los resultados de calados de agua en la cuenca con imágenes validadas a partir de registros de fotos, obtenidas en diversos puntos de la cuenca.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Anon., 2002. En: *Glosario terminológico de la Defensa Civil*. s.l.:s.n.
- Boehner J.K, 2002. "Soil Regionalisation by Means of Terrain Analysis and Process Parameterisation". En: *Soil Classification.. European Soil Bureau*: s.n., pp. 213-222.
- Diccionario de la Lengua Española, 2014. *Concepto de inundación*. s.l.:s.n.
- García Rivero., 2017. *International Journal of Applied Engineering.. Madre de Dios*: s.n.
- Geocuba, 2021. • *Cotas y curvas de nivel topográficas digitalizadas de las hojas cartográficas 1: 25 000 de la regiones de La Habana: Plaza de la Revolución, Centro Habana, Habana Vieja y Cerro*. La Habana(La Habana): s.n.
- Instituto Nacional de Ordenamiento Territorial y Urbanístico (INOTU)., 2023. La Habana(La Habana): s.n.
- Martínez Casanova J.A., 1999. "Modelos Digitales del Terreno: aplicaciones hidrológicas y análisis de la erosión.. *Revista Internacional de Ingeniería Ambiental. España*.
- Olivera J., C. C., 2023. *Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA).. s.l.:s.n.*
- OMM y ONU, 2012. *Glosario Hidrológico Internacional*, s.l.: s.n.
- Open Strep Map(OSM), 2024. *Base de datos cartográfica de Cuba*. s.l.:s.n.
- Rodríguez Marcano, Y., 2019. La manzana de los Cuatro Caminos. *Habana Radio*, 7 Noviembre.
- SAGA, R., 2024. *Delimitación de la Cuenca Chávez o Arroyo Matadero ubicado en la provincia La Habana*. La Habana(La Lisa): s.n.

Acerca de los autores:

Rolando Darío Cárdenas Puentes: Ingeniero hidráulico, graduado en La Universidad Tecnológica José Antonio Echeverría (CUJAE) en el año 2024. Actualmente trabaja en el Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA) como investigador en el estudio de los peligros, vulnerabilidades y riesgos (PVR) en la rama de los peligros por inundaciones debido a las lluvias intensas dentro del territorio nacional. ORCID: 0009-0002-2306-4915

Jorge Olivera Acosta: MSc., graduado en la universidad politécnica de la Habana en 1987 en la especialidad de Geofísica, Tiene más de 30 años de experiencia en la Actividad de Geomática aplicada a la evaluación de peligros, vulnerabilidad y riesgos de desastres, es autor de numerosos artículos científicos en revistas indexadas internacionales. Actualmente labora en el instituto de Geofísica y Astronomía, donde se desempeña como especialista principal del grupo nacional de evaluación de riesgos. ORCID: 0000-0002-6887-5132