

### III. Amenaza por inundación pluvial en una microcuenca urbana de Managua, Nicaragua

MARJORIE ISABEL TORUÑO ÁLVAREZ\*  
INGRID ELIZABETH ÚBEDA TRUJILLO\*\*

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.218.03>

#### Resumen

El capítulo tiene como propósito llevar a cabo un análisis de la amenaza por inundaciones pluviales en una microcuenca de la ciudad de Managua, específicamente en un tramo de cauce o canal pluvial de flujo no permanente que atraviesa el Recinto Universitario Rubén Darío (RURD) de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua). Esta investigación se desarrolla en dos etapas: la primera es un análisis estadístico del régimen de precipitaciones de más de 40 años con el fin de determinar los caudales máximos para la zona. La segunda parte, trata de la simulación de la amenaza por inundación en un canal de drenaje pluvial con base en los caudales máximos determinados. Para ello se utiliza la guía propuesta por Werren y Lasri en 2014. El resultado es un mapa de amenaza por Inundación que aporta a la gestión territorial, ya que propone zonas de restricción, regulación y sensibilización para la ocupación del territorio.

**Palabras clave:** *Amenaza, inundación, simulación, gestión, riesgos, territorial.*

---

\* Maestra en Gestión Integral del Riesgo de Desastres. Profesora-investigadora de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN), Managua, Nicaragua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5230-0134>

\*\* Maestra en Gestión Ambiental. Profesora-investigadora de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN), Managua, Nicaragua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1349-4682>

## Introducción

A través de la historia se ha visto que los fenómenos naturales han causado grandes impactos negativos a la humanidad, entre ellos, las inundaciones han sido uno de los más destructivos. Para el año 2019, se reportó como uno de los cinco principales riesgos mundiales en términos de probabilidad, en el que los eventos meteorológicos extremos están en el primer lugar (World Economic Forum, 2019). Desde el punto de vista de impacto estos ocupan el tercer lugar y el segundo lugar en el fracaso de la mitigación del cambio climático y la adaptación a este.

Cada año docenas de países y millones de personas alrededor del mundo son afectadas por las inundaciones. Estas representan uno de los riesgos naturales que más afectan a la población mundial (Rentschler y Salhab, 2020) y son la catástrofe que trae más daños económicos y pérdidas humanas en Latinoamérica. El informe sobre El costo humano de los desastres presentado por el Centro de Investigaciones sobre la Epidemiología de los Desastres (CRED), reportó que los desastres provocados por inundaciones han aumentado en los últimos 20 años (2000-2019) en un 44%. Esto trajo afectación a 1 650 millones de personas a nivel mundial, la cifra más alta para cualquier tipo de desastre (UNDRR y CRED, 2020).

Para la región central y norte del continente americano, el informe de los servicios climáticos en el reporte dedicado al agua de la Organización Meteorológica Mundial, las inundaciones representaron el 31% de los desastres relacionados con el tiempo, el agua y el clima, el 16% de las muertes y el 9% de las pérdidas económicas. Lo que trajo consigo la muerte de casi 12 000 personas y contribuyeron con pérdidas económicas de 150 000 millones de dólares. Así mismo, el reporte sobre el Cambio Climático en 2023 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), el impacto de las inundaciones en sistemas humanos, es decir, ciudades, asentamientos e infraestructuras a nivel global es elevado. Según este reporte para la región centroamericana y suramericana los datos indican un nivel medio (IPCC, 2023).

En Nicaragua, durante la época de lluvia, desde mayo a noviembre, ocurren muchas inundaciones debido a las fuertes lluvias que son producidas

por 3 principales razones: lluvias intensas en corto tiempo, tormentas tropicales y huracanes. Esto conduce al desbordamiento de ríos, cauces y deslizamientos de tierra.

Entre los huracanes con más afectaciones se puede mencionar el huracán *Juana* en 1988 y las ocurridas con el huracán *Mitch* en 1998, de acuerdo con los registros del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) (2004). Entre los más recientemente huracanes *Eta* e *Iota* en 2020 y tormenta *Julia* en 2022.

En Managua, las inundaciones han ocurrido desde hace muchos años, en parte por su geomorfología en combinación con el efecto del cambio y la variabilidad climática sumado a la actividad humana relacionada con su desarrollo y crecimiento urbano. Las inundaciones pluviales representan una amenaza por la recurrencia, más que por el número de personas afectadas (INETER, 2010). Este tipo de inundaciones durante la época lluvia, trae consigo el desbordamiento de cauces con precipitaciones de mediana intensidad, inclusive. Por lo que es considerada un factor de riesgo para las familias que habitan en los barrios de la ciudad.

Esto genera una gran afectación sobre todo a los barrios que están asentados en la parte más baja de la ciudad a la orilla del lago Xolotlán. Con elevaciones por debajo de los 50 metros sobre el nivel del mar (msnm), los hace enfrentarse a grandes volúmenes de agua de lluvia que circula por los sistemas de drenajes existentes, muchos en deterioro o con insuficiente capacidad para encausarlos. Jha *et al.* (2012) menciona que como medidas de mitigación se han instalado sistemas de micro represas para tratar de disminuir la cantidad de desechos que baja desde la parte alta; sin embargo, la problemática continúa. El 28 de septiembre de 2017, se registró una inundación en la ciudad de Managua, causada por precipitaciones más intensas y de corta duración de aproximadamente 40 minutos con 100 mm, a lo cual se sumó la incapacidad del sistema de drenaje en canalizar el volumen de lluvia en tan poco tiempo (Moncada y Tórrez, 2017). Esto dejó una afectación en varias partes de la ciudad de por al menos tres horas en el sistema de transporte, viviendas y hospitales inclusive.

Para el estudio de las inundaciones en Nicaragua se diseñó una guía metodológica propuesta por INETER y la Agencia de Cooperación Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE). El objetivo de esta guía es

estandarizar criterios y simbología para el proceso de elaboración de Mapas de Amenaza por Inundación que fue construida con base en la revisión de diferentes metodologías utilizadas a nivel nacional e internacional (INETER y COSUDE, 2005). El enfoque de ésta son las inundaciones fluviales a escala 1:50,000, 1:10,000 y 1:5000. Sin embargo, el estudio de la amenaza por inundaciones pluviales en contextos urbanos no está contemplado.

Las inundaciones pluviales se producen por la acumulación de agua de lluvia en un determinado lugar o área geográfica sin que ese fenómeno coincida necesariamente con el desbordamiento de un cauce de río (fluvial). Este tipo de inundación se genera tras un régimen de precipitaciones intensas o persistentes, entendido como la concentración de un elevado volumen de lluvia en un intervalo de tiempo muy breve o por la incidencia de una precipitación moderada y persistente durante un amplio periodo de tiempo sobre un suelo poco permeable (INETER y COSUDE, 2005). Reconociendo el vacío de herramientas para analizar este tipo de fenómenos se propone esta investigación como aporte a la gestión de riesgos de desastres (GRD) para la ciudad de Managua.

La GRD es un proceso continuo, sistémico y sistemático. En este se distinguen 3 grandes etapas o momentos de actuación: Antes, Durante y Después. Estas etapas, se subdividen en 8 categorías: 1) Identificación de los Riesgos, 2) Previsión, 3) Prevención, 4) Mitigación, 5) Preparación, 6) Auxilio, 7) Recuperación y 8) Reconstrucción, según la Coordinación Nacional de Protección Civil de México (2016). Bajo esta concepción este trabajo se ubica en la etapa del Antes en la categoría de Identificación de los factores de Riesgos.

También se alinea al marco internacional, regional y nacional para la GRD. El Marco de Sendai (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres [UNDRR], 2015) y a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en especial el ODS 11 que sugiere “Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles”.

A nivel regional se articula con el eje número 3: “Gestión del Riesgo de Desastres y su relación con el cambio climático” de la Política Centroamericana de Gestión Integral de Riesgos de Desastres CEPREDENAC (2017). Y a nivel nacional se alinea con el Plan Nacional de Lucha contra la Pobreza y Desarrollo Humano (PNDLP-DH) para 2022-2026 promovido por el

Gobierno de Reconciliación y Unidad Nacional (GRUN) de Nicaragua en sus lineamientos número 10: “Ciudades, barrios y comarcas inclusivas, saludables, creativas, seguras, resilientes y sostenibles; y el número 11: “Medidas para mitigar los impactos de la variabilidad climática y el cambio climático” (GRUN-Nicaragua, 2021).

Además, en Nicaragua, está constituido por la Ley No. 337 (2000), Ley Creadora del Sistema Nacional para la Prevención, Mitigación y Atención de Desastres (Sinapred). A través de este sistema se integran los diferentes niveles territoriales; nacional, departamental, municipal, comunitario, familia e individuo. Lo que se ha convertido en una fortaleza para todo el país, ya que se pueden gestionar los factores de riesgos en todos los niveles. Este sistema también articula diferentes comisiones intersectoriales en el que las universidades forman parte de ellas en dependencia del ámbito de acción de cada área del conocimiento. En complemento a esta ley se han creado un marco legal y regulatorio con el fin de fortalecer la gestión de los Riesgos de Desastres en nuestro país y reducir el Riesgo de Desastres.

El propósito de esta investigación es llevar a cabo un análisis de la amenaza por inundaciones pluviales en una microcuenca de la ciudad de Managua, específicamente en un tramo de cauce o canal pluvial de flujo no permanente que atraviesa el Recinto Universitario Rubén Darío (RURD) de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua). Para ello se sigue la guía propuesta por Werren y Lasri (2014), la cual surge de un trabajo conjunto entre las universidades de Lausana en Suiza y la Universidad de Fez en Marruecos. Esta propuesta tuvo como finalidad adaptar el método utilizado en Suiza, donde tienen muchos años de experiencia en este tipo de estudios, a los contextos de inundaciones en Marruecos. Werren *et al.* (2016) aplicaron esta metodología para llevar a cabo la cartografía de las inundaciones en Beni Mellal, Marruecos.

Este estudio dio como producto final el Mapa de Amenaza por Inundación, sin embargo, durante el proceso se obtienen productos intermedios. Del análisis hidrológico se obtiene los caudales máximos para los tres periodos de retornos considerados. Del análisis hidráulico se obtuvo la simulación del comportamiento del flujo de agua considerando la velocidad, profundidad y extensión de la inundación con base en las condiciones de la topografía del entorno y la geometría del cauce o canal pluvial evaluado.

## Ubicación del área de estudio

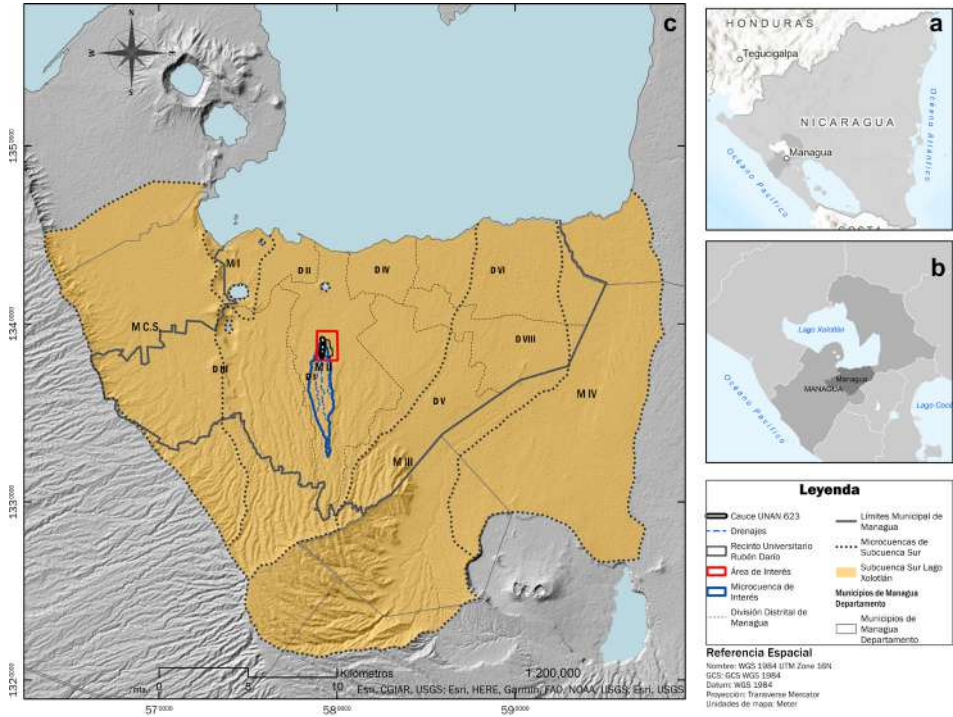
El área de estudio se localiza en el municipio de Managua (Ordenanza Municipal 03-2009, 2009), en el Distrito I de la ciudad capital, con una extensión de 46 km<sup>2</sup>, con elevaciones de 38 a 790 msnm. Es parte de la microcuenca II de la Subcuenca sur del Lago Xolotlán de Managua (INETER *et al.*, 2014) y en ella se encuentran los principales cauces que atraviesan la ciudad capital y forman la red de drenaje pluvial primaria de Managua. En esta se ubica el Recinto Universitario Rubén Darío (RURD) de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua (UNAN-Managua) (véase figura 1).

## Metodología

La evaluación de la amenaza de inundación puede realizarse desde dos enfoques; deterministas o probabilistas, Di Baldassarre *et al.* (2010) que se citó en Sy *et al.* (2019). Los resultados se expresan como una probabilidad (o frecuencia) de inundación con una magnitud o intensidad determinada durante un periodo de tiempo específico (Apel *et al.*, 2008; Dottori *et al.*, 2016; Pappenberger *et al.*, 2012). Por otro lado, la fiabilidad de los resultados depende en gran medida de la disponibilidad y calidad de los datos, la escala del análisis y la plena comprensión de los límites de los enfoques utilizados (Sy *et al.*, 2019, p. 1).

El método para el análisis de la amenaza por inundación que se utilizó para este estudio fue el propuesto por Werren y Lasri (2014) y se adaptó para realizar este análisis. Consta de diferentes etapas en las que se incorporan datos de entrada como las precipitaciones máximas diarias registradas para la zona y un modelo de elevación digital. Para el análisis estadístico de las precipitaciones se incorporó el método utilizado por Úbeda Trujillo (2018) con el cual se determinan las curvas de Intensidad- Duración- Frecuencia a partir de las cuales, a través del método de Isocronos de Clark (1945), se calculan los caudales máximos para los tres periodos de retorno considerados.

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio



Notas: (a) Ubicación de Nicaragua en América Central; (b) Ubicación del departamento de Managua (gris medio) y municipio de Managua (gris oscuro); (c) Mapa de ubicación de la subcuenca Sur del lago Xolotlán o lago de Managua en color amarillo (las microcuencas que componen a la subcuenca Sur del lago Xolotlán definidas por la línea punteada negro incluida, la microcuencia en estudio [polígono azul]), basado en INETER (2011) y división distrital del municipio de Managua, líneas punteadas (gris claro); el recuadro rojo indica la zona de interés para el estudio, el polígono indica la ubicación y extensión del RURD y la línea blanca con borde negro el cauce revestido que atraviesa el recinto y se extiende en dirección norte.

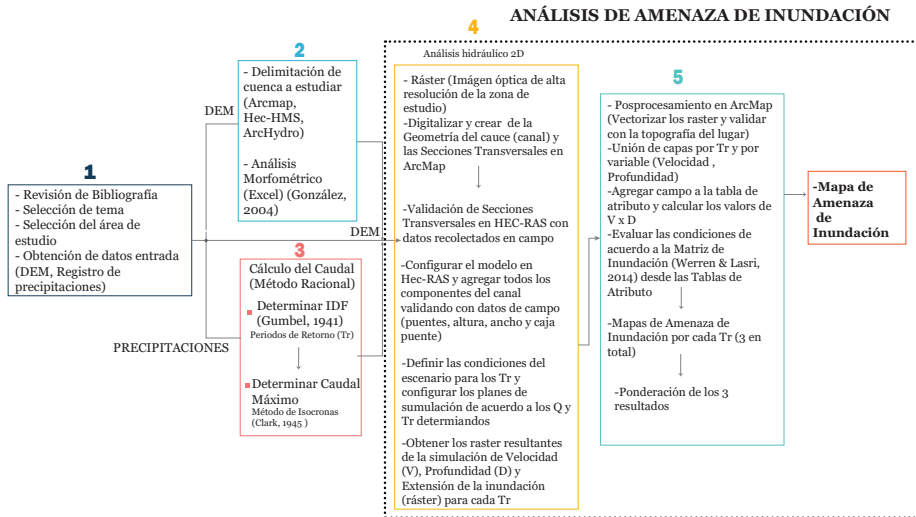
Fuente: Elaboración propia con base en el DEM ALOS PALSAR 12.5 m (NASA, 2020) y la base cartográfica de INETER (1989).

Al mismo tiempo se hace el levantamiento de la geometría del canal, secciones transversales de este y el modelo de elevación digital, los que se introducen en el modelamiento. Durante el proceso se obtienen diferentes productos que a su vez se incorporan como datos de entrada para otros procesamientos los que nos llevan a obtener mapas de intensidad y de probabilidad de las inundaciones pluviales por periodo de retorno. Estos mapas se contrastan para llegar finalmente al Mapa de la Amenaza por Inundación para la zona en estudio.

Este enfoque permite predecir la probabilidad de que se produzcan inundaciones en diferentes momentos. Así mismo se determina la profundidad, velocidad y extensión de la inundación tomando en cuenta los datos hidrológicos y de terreno disponibles (Echogdali *et al.*, 2022). Para este análisis se realizaron simulaciones para tres periodos de retorno de 30, 100 y 300 años.

Este trabajo corresponde a una investigación aplicada bajo un enfoque de investigación cualitativo, no experimental, de tipo transversal con un nivel de investigación predictivo. Para el desarrollo de ésta se siguió la siguiente ruta metodológica que se describe en la figura 2.

Figura 2. Ruta metodológica



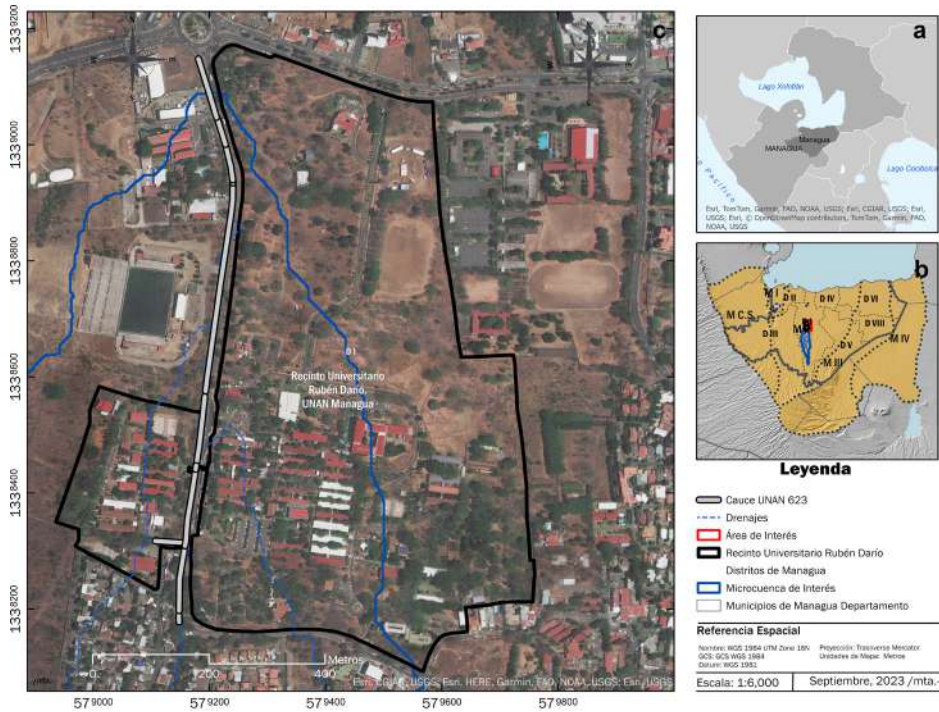
Fuente: Elaboración propia.

### Revisión bibliográfica y obtención de los datos de entrada

Para el análisis de la amenaza por inundación existen varios métodos: deterministas o probabilistas, Di Baldassarre *et al.*, (2010) que se citó en Sy *et al.* (2019). Los factores a considerar generalmente siempre son el caudal, la precipitación, la intensidad, tiempo de concentración, topografía, la escala y la precisión de los datos (Robledo Molina, 2011).



Figura 3. Microlocalización del área de estudio



Nota: (a) Ubicación del departamento y ciudad de Managua, elaborado con base en la Base Cartográfica de (INETER, 1989). (b) División de la subcuenca sur del lago Xolotlán (lago de Managua) y la división distrital de la ciudad de Managua. (c) Ubicación y extensión del Recinto o Campus Universitario Rubén Darío y el cauce (canal) que circula al costado oeste del recinto.

Como primera etapa se hizo una revisión bibliográfica sobre los métodos existentes y su aplicación, del tipo, cantidad, escala y precisión de los datos requeridos, con lo que se logró identificar a partir de la información disponible en nuestro país que se requiere de un Modelo de Elevación Digital (DEM) y el registro de precipitaciones de al menos 50 años, ambas fuentes de información se obtuvieron del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), un DEM de resolución espacial de 2 m y el registro de precipitaciones diarias correspondiente a un periodo de 58 años (1958-2015) provenientes de la estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino a 14 km de la zona de estudio.

Se eligió analizar el comportamiento hidráulico del cauce o canal que atraviesa gran parte del RURD de la UNAN-Managua, debido a que en sus

alrededores se encuentra infraestructura pública y privada de interés para la ciudad como el Estadio Nacional de Fútbol, la Universidad Iberoamericana (UNICIT), gasolinera, rotonda, tienda de automóviles, tienda de alimentos, entre otros. Este desarrollo ha traído la necesidad de modificar el diseño original de este cauce, por lo que se han construido puentes dentro del cauce que se han convertido en puntos de obstrucción al caudal que se conduce por este canal, lo que ha provocado en algunas ocasiones desbordamiento de este (véase figura 3).

### Delimitación de la microcuenca en estudio y análisis morfométrico

Se delimitó la microcuenca de interés en la que se utilizó herramientas como Microsoft Excel y herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), ArcGIS 10.5. en combinación con la herramienta incorporada como ArcHydro para y la herramienta HEC-GeoHMs. El dato de entrada para este procesamiento es el DEM obtenido previamente, utilizando la Metodología de Pfafstetter (ANA, 2002; Benites Ramos *et al.*, 2015; Rosas, 2009).

Se llevó a cabo el análisis morfométrico (Cruz Romero *et al.*, 2015; González, 2004) de la microcuenca delimitada para el que se utilizaron las ecuaciones descritas en la tabla 1.

Tabla 1. Ecuaciones de parámetros morfométricos de una cuenca

No.	Ecuación	Fuente	Descripción	Parámetros
E1	$Kc = 0.2821 \left( \frac{P}{\sqrt{A}} \right)$	Gravelius (1914) y Luchisheva (1950) (citados en Zavoianu, 1985)	Coefficiente de compacidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kc = Coeficiente de compacidad</li> <li>• P = Perímetro de la microcuenca (km)</li> <li>• A = Área de la microcuenca (km<sup>2</sup>)</li> <li>• Constante = 0.2821</li> </ul>
E2	$L_M, L_m = Kc \times \frac{\sqrt{A}}{1.1284} \times \left( 1 \pm \sqrt{1 - \left( \frac{1.1284}{Kc} \right)^2} \right)$		Lado Mayor y Lado menor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L<sub>M</sub> = Lado Mayor</li> <li>• L<sub>m</sub> = Lado menor</li> <li>• Kc = Coeficiente de Compacidad</li> </ul>
E3	$F = \left( \frac{A}{L_M} \right)^2$	Horton (1932)	Factor de Forma	<ul style="list-style-type: none"> <li>• F = Es la forma</li> </ul>

E4	Schumm (1977)	Pendiente del cauce	<ul style="list-style-type: none"> <li>• P = Pendiente del cauce</li> <li>• <math>C_M</math> = Cota Mayor</li> <li>• <math>C_m</math> = Cota menor</li> <li>• L = Longitud del drenaje principal</li> </ul>
$P = \frac{C_M - C_m}{L}$			
E5	Horton (1932)	Densidad de las corrientes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>D_s</math> = Densidad de las corrientes o cauces (km/km<sup>2</sup>)</li> <li>• <math>N_s</math> = La suma de los cauces tributarios (km)</li> </ul>
$D_s = \frac{N_s}{A}$			

Fuente: Elaborada con base en las ecuaciones propuestas por los autores de la columna.

### Cálculo del caudal máximo

A continuación, se procede a calcular el caudal máximo para distintos periodos de retorno ( $T$ ). Este proceso se realiza bajo el método racional a través de la ecuación E6. Se divide en dos etapas, la primera es obtener los valores de Intensidad-Duración y Frecuencia para cada periodo de retorno planteado, el dato de entrada inicial para este proceso es el registro de precipitaciones máximas diarias y el método utilizado es el Modelo de Distribución de Gumbel o también llamado Extrema Tipo I (Gumbel, 1941). Se obtiene el valor de los caudales máximos para cada uno de los periodos de retorno, tomando como dato de entrada los valores de precipitación máxima diaria, la intensidad y el tiempo de concentración determinado para esta cuenca. Este proceso se logra utilizando el Método de Isocronos (Clark, 1945). El tiempo de concentración representa el tiempo que demora una partícula de agua para trasladarse del punto más remoto de la cuenca hasta el punto de desagüe. Cuando haya transcurrido este tiempo toda la cuenca estará contribuyendo a formar el caudal de la escorrentía que tendrá en consecuencia un valor máximo (Chequere, 1989). Donde  $Q$  = Caudal;  $C$  = Coeficiente de escorrentía;  $i$  = Intensidad de lluvia (mm/h), y  $A$  = Área de la cuenca (ha).

$$Q = \frac{(C \times i \times A)}{360}$$

Para determinar los valores de Intensidad-Duración-Frecuencia, hubo que hacer un procesamiento bastante extenso guiado por el Modelo de Distribución de Gumbel o también llamado Extrema Tipo I (Chow *et al.*, 1994) y (Aparicio Mijares, 1992) y está definida por la ecuación E7 de la tabla 2.

Tabla 2. Ecuaciones de variables probabilísticas

No.	Ecuación	Descripción	Parámetros
E7	$F(x) = \exp \left[ -\exp \left( -\frac{x-u}{\alpha} \right) \right] - \infty \leq x \leq \infty$	Función de distribución de probabilidad	
E8	$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} s$	Variable probabilística	• $S$ = Desviación estándar
E9	$u = \bar{x} - 0.5772\alpha$	Variable probabilística	• $\bar{x}$ = Media
E10	$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$	Media	• $i$ = Cada registro de precipitaciones máximas anuales • $n$ = Número total de los registros
E11	$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$	Desviación estándar	
E12	$y_T = -\ln \left[ \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right]$	Variable reducida	Chow <i>et al.</i> (1994)
E13	$x_T = u + \alpha y_T$	Precipitación	(Chow <i>et al.</i> (1994)

Fuente: En esta tabla se presentan las ecuaciones para determinar las variables probabilísticas propuestas por Gumbel (1941) y Chow *et al.* (1994).

Este método es muy usado en análisis hidrológicos para conocer el comportamiento de las precipitaciones máximas o mínimas, es decir, crecidas o sequías. Como datos de entrada se utiliza la serie de registros históricos de precipitación máxima diaria en cada año. Entre los cálculos iniciales se obtienen las variables probabilísticas como la media, desviación estándar y los parámetros de distribución los cuales se estiman a partir de las ecuaciones E8 y E9 de la tabla 2. Donde  $\bar{x}$  y  $S$  son la media y la desviación estándar de la muestra, para ello se utilizan las ecuaciones E10 y E11 de la tabla 2.

Para obtener los valores de las precipitaciones máximas probables para distintas frecuencias, se parte del registro de las precipitaciones máximas

diarias y de las variables probabilísticas del acápite anterior. La variable reducida se obtiene con la ecuación E12 (Chow *et al.*, 1994). Se calcula la precipitación máxima con la ecuación E13. A esta última se le aplica un ajuste, conocido como Factor de corrección por intervalo fijo. Este factor fue propuesto por (Weiss, 1964), el que a partir del análisis estadístico de miles de datos de precipitaciones observadas en un intervalo fijo de 24 horas, determinó que al incrementar los datos de precipitación en un 13%, los valores resultantes se aproximan a los valores de precipitaciones máximas reales. Por esta razón, a los valores obtenidos de la ecuación E13 se multiplican por este factor y se obtiene los valores de Precipitación máxima corregida, para los periodos de retorno considerados, que corresponden a 2, 5, 10, 30, 100 y 300 años.

Cuando los datos de precipitación por hora son muy escasos, se pueden determinar al relacionar datos de precipitación máxima en un día a través de un coeficiente para 24 h con igual periodo de retorno propuesto por Campos Aranda (1998), como se puede observar en la tabla 3.

Tabla 3. Coeficientes para las relaciones a la lluvia de duración 24 horas

Duración en horas	1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
Coeficiente	0.3	0.39	0.46	0.52	0.57	0.61	0.68	0.8	0.91	1

Fuente: En esta tabla se presentan los coeficientes para obtener el valor de lluvias por hora propuesto por Campos (1998).

### Curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF)

Para determinar las intensidades de lluvia se utilizan las precipitaciones diarias calculadas, se dividen entre el tiempo de duración en horas, introduciéndola en la ecuación E15, con lo que se obtiene:

$$I = \frac{P [mm]}{t_{duración [hr]}} \quad E14$$

Para obtener las curvas de IDF, se aplican la ecuación E15 para cada periodo de retorno:

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n} \quad \text{E15}$$

Donde  $T$  = periodo de retorno,  $m$  = coeficiente de regresión,  $t$  = tiempo de duración de la precipitación expresada en minutos;  $K$ ,  $m$  y  $n$  son parámetros de ajuste, estos parámetros se calcularon mediante la aplicación de logaritmos naturales a cada variable para obtener una expresión matemática que represente la variación de la intensidad de precipitación en función de la duración de la misma (Campos Aranda, 1998; Bermúdez, 2012).

Para obtener el coeficiente de regresión y los parámetros de ajuste ( $K$ ,  $m$  y  $n$ ), se calculó la Regresión Intensidad-Duración-Período de Retorno (IDT) a través de la ecuación E16 y E17, que toma como dato de entrada los tiempos de duración en minutos y la Intensidad de la lluvia (mm/h) por cada periodo de retorno y el número de intervalos de duración en horas propuesto por (Campos Aranda, 1998) y que en este trabajo se representa por  $N$ .

$$\ln(d) = \frac{[\sum_{i=1}^N (\ln(x) \times \ln(y))] - [\sum_{i=1}^N (\ln(x))^2 \times \sum_{i=1}^N \ln(y)]}{[\sum_{i=1}^N \ln(x)]^2 - [\sum_{i=1}^N ((\ln x)^2) \times N]} \quad \text{E16}$$

Se aplica antilogaritmo a  $\ln(d)$  para obtener los valores para  $d$ . Además, a partir de obtenido el valor de, se obtiene el valor de  $n$  con utilizando la ecuación E17:

$$n = \frac{[\sum_{i=1}^N \ln(y) - (N \times \sum_{i=1}^N \ln(d))]}{\sum_{i=1}^N \ln(x)} \quad \text{E17}$$

Donde  $x$  corresponde al tiempo de duración expresado en minutos de acuerdo a los intervalos propuestos por (Campos Aranda, 1998) para el cálculo del coeficiente para lluvias de duración de 24 horas.  $N$ , representa el número de estos intervalos (24, 18, 12, 8, 6, 5, 4, 3, 2 y 1 hora), es decir 10 y  $d$  que corresponde al término constante de regresión, que se utilizada para calcular Coeficiente de regresión  $n$  para cada periodo de retorno. A partir de estos cálculos se construye una table resumen con los valores

obtenidos para  $d$  y  $n$  en cada periodo de retorno que luego se promedia para ser introducido en la ecuación E15 antes mencionada.

Posterior a estos cálculos, se utiliza la ecuación E18, con el fin de obtener el valor de los parámetros  $k$  y  $m$ , a través de regresión de potencia entre las columnas del periodo de retorno  $T$  y el término constante de regresión  $d$  obtenido anteriormente utilizado (Úbeda Trujillo, 2018).

$$d = K \times T^m \quad \text{E18}$$

Para ello, se utiliza la ecuación E18 con base en los logaritmos naturales de  $x$  que para este cálculo está representado por los diferentes periodos de retornos y la variable  $y$ , que toma los valores del Término constante de regresión  $d$ , del cálculo anterior. Para calcular los parámetros  $k$  y  $m$ , se utiliza la ecuación E19, que básicamente es la misma ecuación E16 con la diferencia que en esta ocasión se calcula el  $\ln(k)$ .

$$\ln(k) = \frac{[\sum_{i=1}^N (\ln(x) \times \ln(y))] - [\sum_{i=1}^N (\ln(x))^2 \times \sum_{i=1}^N \ln(y)]}{[\sum_{i=1}^N \ln(x)]^2 - [\sum_{i=1}^N ((\ln x)^2) \times N]} \quad \text{E19}$$

De nuevo se aplica antilogaritmo a  $\ln(k)$  para obtener el valor absoluto del parámetro  $k$ . De forma similar el valor del parámetro  $m$  se obtiene utilizando la ecuación E17, pero con los valores correspondientes a  $\ln(k)$ . A partir de estos cálculos de regresión se obtienen todos los parámetros necesarios para proceder a calcular las curvas IDF para cada periodo de retorno.

### Cálculo del hietograma de precipitación

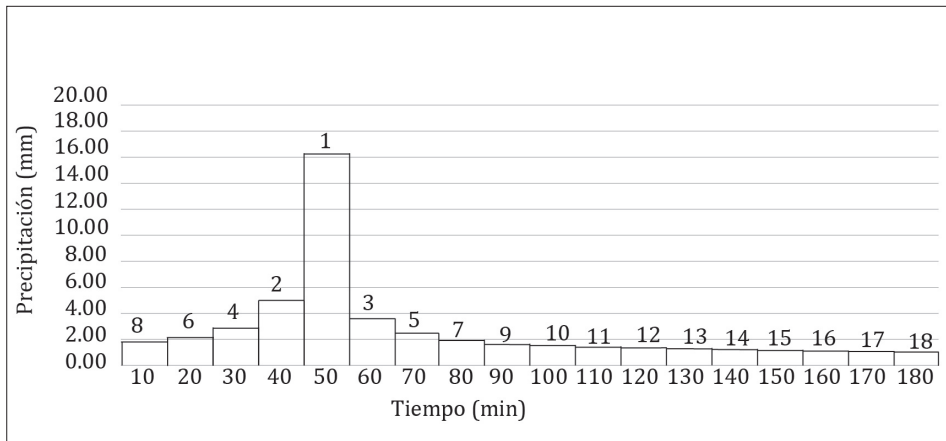
Según Chow *et al.* (1994), en los modelos de diseño antiguos, entre ellos el método racional, solo se ocupaba el caudal pico, es decir, no se tomaba en consideración el tiempo de distribución del caudal, lo que conocemos como hidrograma del caudal ni tampoco la distribución temporal de la precipitación, hietograma de precipitación. Según este autor, los métodos más recientes toman en cuenta el análisis de flujo no permanente, para los cuales requieren el hietograma de diseño, esta muestra la distribución de las

precipitaciones a lo largo de las horas más lluviosas en un periodo de retorno y área determinada. La construcción del hietograma de precipitación de esta microcuenca para diferentes periodos de retornos como 2, 5, 10, 30, 100 y 300 años, se utilizó el método Bloques Alternos propuesto por Chow *et al.* (1994).

$$Tc = 0.066 \left( \frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77} \tag{E20}$$

Se construye a partir de las curvas IDF y se puede generar para cada periodo de retorno. La forma de construirlo es que se coloca en el centro del diagrama la precipitación registrada que corresponde al tiempo de concentración de la cuenca, a su derecha se coloca el segundo intervalo lluvioso, a la izquierda se coloca el tercer intervalo más lluvioso y luego a la derecha se coloca el siguiente, se siguen colocando las precipitaciones alternándose a cada lado, como se muestra en la figura 4. Se toman en consideración los siguientes datos cada periodo de retorno y se diseña un hietograma para una lluvia que dura 3 horas con incrementos de tiempo de 10

Figura 4. Modelo de hietograma de precipitación



Fuente: elaborado con base en los registros de precipitaciones de la zona registrados por la Estación Meteorológica del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino de Managua y del cálculo del tiempo de concentración.

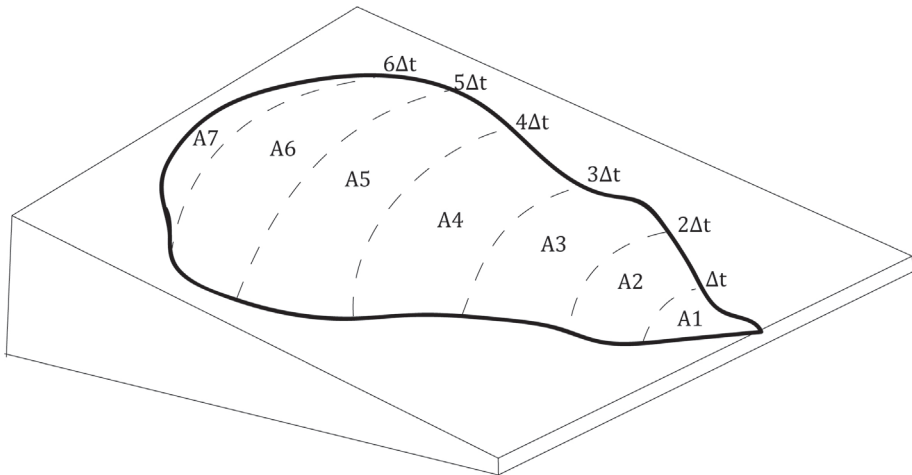


minutos, lo que da 180 minutos divididos en 18 intervalos de 10 minutos. El tiempo de concentración, se obtiene con la ecuación E20, donde  $L$ , corresponde a la longitud del drenaje más largo y  $S$  al valor de la pendiente del canal.

### Cálculo del caudal máximo por el método de isocronos

El método se basa en la distribución de la superficie de la cuenca entre líneas isócronas, es decir con un intervalo de tiempo igual, para calcular el volumen de agua caído sobre cada una de esas superficies y considerar el retardo producido por el tránsito del agua a lo largo de la cuenca (Clark, 1945). El caudal del primer intervalo de tiempo corresponde al volumen precipitado en la primera franja que representa a la primera área calculad (véase *figura 5*).

Figura 5. Esquema conceptual del método de isócronos



Fuente: Sánchez San Román (2011).

Su ecuación corresponde a la del método racional (E6), expresada de la siguiente manera:

$$Q_{T1} = k \cdot C_{R1} \cdot i_{T1} \cdot A_1 \quad \text{E21}$$

Donde

- $Q_{T1}$  = Caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $C_{R1}$  = Coeficiente de escorrentía
- $i_{T1}$  = Intensidad de precipitación ( $\text{mm}/\text{h}$ )
- $A_1$  = Superficie o área ( $\text{ha}$ )
- $k = \frac{1}{360} = 0.00278$

De manera que el caudal total corresponde a la sumatoria de los caudales calculados para cada superficie o área.

$$Q_{T1} = k \cdot C_{R1} \cdot i_{T1} \cdot A_1$$

$$Q_{T2} = C_{R2} \cdot i_{T1} \cdot A_2 + C_{R1} \cdot i_{T2} \cdot A_1$$

$$Q_{T3} = C_{R3} \cdot i_{T1} \cdot A_3 + C_{R2} \cdot i_{T2} \cdot A_2 + C_{R1} \cdot i_{T3} \cdot A_1$$

Se seleccionó este método para calcular los caudales máximos ya que se acopla bastante bien al tipo de análisis que se viene haciendo desde el inicio del estudio considerando la cantidad y el tipo de datos de entrada.

### **Análisis de amenaza por inundación**

Existen varios factores que favorecen a las inundaciones, por ejemplo, el incremento del coeficiente de escorrentía en las zonas urbanas en comparación con las rurales debido a una mayor proporción de áreas impermeables en dichas zonas. Otro factor es la disminución del tiempo de concentración en las áreas urbanas, debido a que los flujos son más rápidos, aumentando a su vez los caudales picos de dos a cinco veces y con ello el potencial de inundación (Dourojeanni y Jouravlev, 1999).

## Análisis hidráulico en 2D

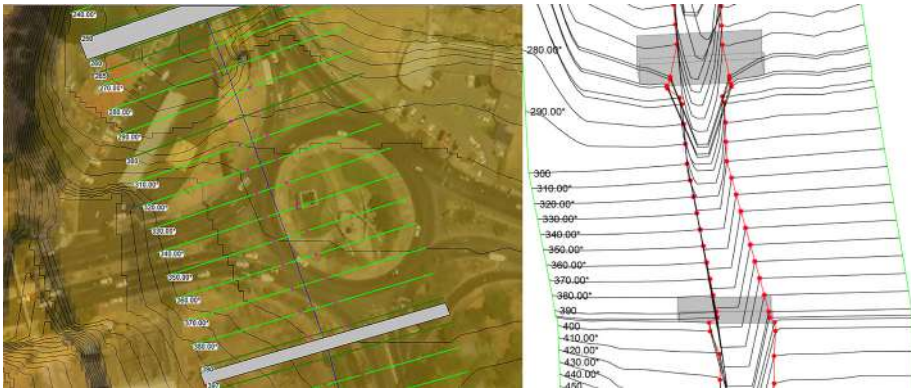
El proceso del análisis hidráulico inicia tomando como base un modelo de elevación digital de 2 m y un mapa base obtenido de la galería de imágenes ópticas de Google Maps de alta resolución. Otro dato importante para iniciar este proceso también lo es los caudales obtenidos a través del método de isócronos.

Se digitalizó la longitud del canal principal revestido con concreto de la microcuenca delimitada para el estudio, las bancas y se generó secciones transversales automáticas de 100 metros de longitud con una distancia entre cada una de 100 metros, utilizando la herramienta HEC-GeoRAS incorporada en ArcGIS Desktop 10.5. La geometría resultante se importó a HEC-RAS 5.0.7. para hacer el análisis hidráulico. Se verificaron y corrigieron las secciones transversales generadas automáticamente por la herramienta, y se definieron las bancas y los leeves tomando en cuenta la topografía y los posibles puntos de desbordamiento. Para validar las secciones transversales, se comparó con el levantamiento de las secciones transversales en campo y reforzamiento con el registro fotográfico. Posteriormente se incorporó la geometría de los puentes existentes. Para ello fue necesario agregar secciones transversales interpoladas y hacer ajustes de distancias y de altitudes para conservar la geometría lo más apegado a la realidad.

Entre las secciones 400 a 260 existe una rotonda que hace la función de un puente de aproximadamente 150 metros de longitud. Para el procesamiento en HEC-RAS, se ha ingresado al modelo como un puente al inicio para crear el efecto de compresión a la entrada del canal cubierto y se han puesto leeves para indicar al modelo que el agua no debe sobre pasar esa altura (véase figura 6).

Se asignaron los coeficientes de rugosidad para el canal y para el resto de la sección transversal que no está revestida, se asume que dentro del canal el coeficiente de rugosidad es 0.015, correspondiente a hecho de cemento con mortero. Para el área fuera del canal, se considera planicie de inundación, con cubierta de tipo pasto corto, con un coeficiente de 0.035. Después que se corrigen las secciones transversales, se procede a configurar el tipo de flujo considerando las Condiciones Límites alcanzables (Reach Boundary Conditions) con profundidad normal (Normal Depth) y se asigna una pendiente de 5% aguas arriba y aguas abajo.

Figura 6. Incorporación de rotonda en el modelo hidráulico



Fuente: Extraído del modelo hidráulico de HEC-RAS de este estudio.

Con este parámetro HECRAS 5.0.7 parte de la hipótesis de que en la sección aguas arriba hay un flujo normal (Steady) calculado con la ecuación de Manning (E22), tomando en cuenta una pendiente de 5%, y se aplica esta misma hipótesis en la última sección. Además, como dato principal se introdujo el caudal calculado para los periodos de retorno, para la preparación de los Mapas de Amenaza por Inundación, se aplicó esta configuración para los tres periodos de retornos.

$$Q = \frac{1.49}{n} S_f^{0.5} A R^{\frac{2}{3}} \quad \text{E22}$$

Se configuró el comportamiento de un flujo normal a través de la configuración de planes con lo que se genera las simulaciones de Inundación para los periodos de retornos mencionados. Para ello se seleccionó el régimen tipo mezclado (Mixed), también se incorporó la geometría ajustada, se configuraron las opciones del Método de computación de la profundidad crítica que para este caso se ha seleccionado el Método Parabólico o Método Fácil calculando siempre la profundidad crítica. Como resultado de la simulación se obtuvo el perfil longitudinal y perfil 3D de toda la geometría. Todo este procesamiento intermedio da como resultado la simulación de la Velocidad (Velocity), Profundidad (Depth) y la extensión de la inundación

de manera implícita expresadas en formato ráster para cada Periodo de Retorno ( $T$ ).

El resultado anterior, se exporta de HECRAS en formato .tiff y se importa nuevamente a ArcMap y se reclasifican y se transforma de formato ráster a vector y se procede a validar sobre la capa de información de la extensión comparándola con la topografía de lugar y datos levantados en campo. A partir de estas capas de información corregidas se aplica un geoprocesamiento de Unión, que consiste en unir las dos capas en una, de manera que sus tablas de atributos se integran en una sola, se crea un nuevo campo llamado  $V \times D$  y usando la herramienta calculadora de campo se realiza la operación de multiplicar los campos o columnas de Velocidad (Velocity o  $V$ ) y Profundidad (Depth o  $D$ ), con la cual se construye un nuevo mapa que ilustra este resultado.

Posteriormente, se agregó un nuevo campo a esta tabla de atributos llamado Condicional 1; esta columna aloja la condición que —de acuerdo con el método propuesto por Werren y Lasri (2014) para crear mapas de intensidad de inundación— se debe cumplir para definir niveles de Intensidad (véase tabla 4).

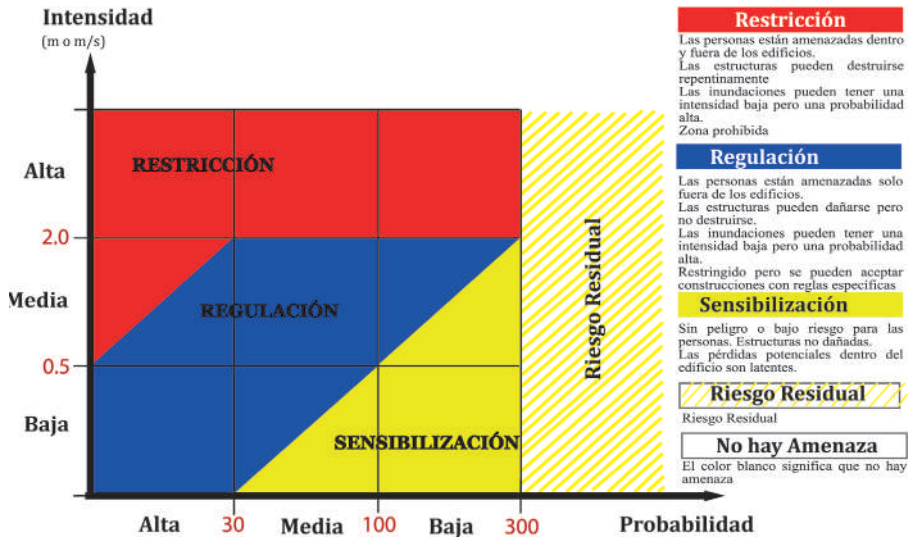
Tabla 4

<i>Condicional</i>	<i>Intensidad</i>
Velocity < 1 AND Depth__m_ ≤ 0.5	Baja
Velocity < 1 AND Depth__m_ ≥ 2	Alta
Velocity < 1 AND Depth__m_ < 2 AND Depth__m_ > 0.5	Media
Velocity > 1 AND $V\_ \times\_ D < 2$ AND $V\_ \times\_ D > 0.5$	Media
Velocity > 1 AND $V\_ \times\_ D > 2$	Alta
Velocity > 1 AND $V\_ \times\_ D < 0.5$	Baja

Nuevamente, se agrega un campo más a la tabla de atributos que aloje las condiciones que se deben cumplir para definir los niveles de Amenaza por Inundación basados también en método utilizado en Suiza por Werren y Lasri (2014) (véase figura 7). Las condiciones por cumplir para definir Amenaza por Inundación son las siguientes:

- i)  $V\_ \times\_ D > 2$
- ii)  $V\_ \times\_ D > 0.5$  AND  $V\_ \times\_ D \leq 2$
- iii)  $V\_ \times\_ D \leq 0.5$

Figura 7. Matriz de Amenaza por Inundación



Fuente: Tomada y traducida de Werren y Lasri (2014).

## Resultados

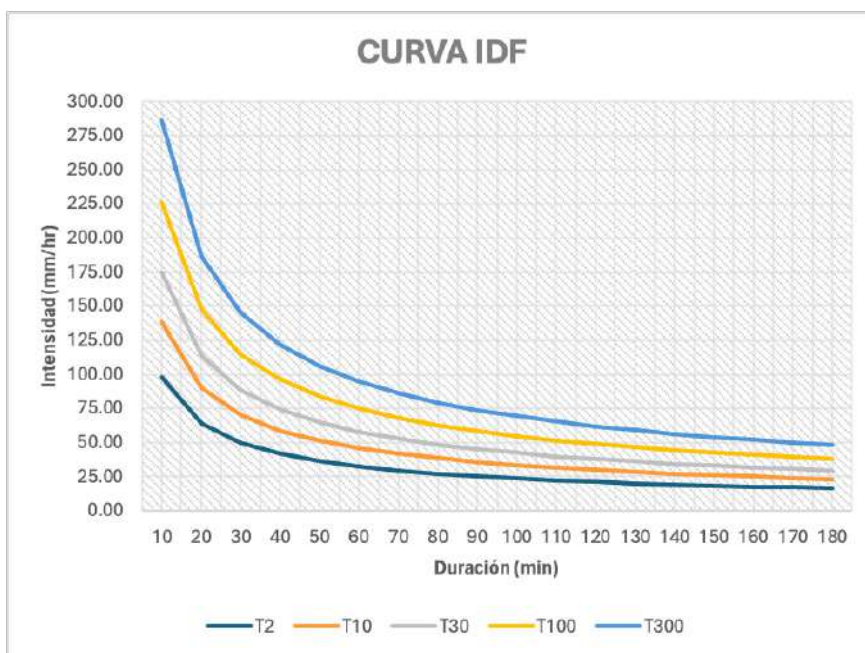
Como resultado de la delimitación y caracterización de la microcuenca determinó que la cuenca en estudio se categoriza como una microcuenca con un área total de 4.96 km<sup>2</sup>. El Coeficiente de Compacidad correspondiente a 2.32, es de forma oblongada, inclusive por encima del rango máximo para este tipo de forma de microcuenca. En la tabla 5 se presentan los valores de los parámetros morfométricos de la cuenca.

Se calculó la Intensidad para una precipitación con duración de 3 horas, de acuerdo con el Hietograma de Precipitación que se construyó a partir del tiempo de concentración calculado para la cuenca que correspondió a 50 minutos. Los parámetros requeridos para construir las Curvas IDF, son:  $K = 151.79$ ;  $m = 0.792266679$ , y  $n = 0.615$ , que corresponde al promedio de los valores de coeficiente de regresión para cada periodo de retorno, dando los resultados que muestran en la figura 8.

Tabla 5. *Parámetros morfométricos de la cuenca en estudio*

<i>Información requerida</i>	<i>Morfometría</i>	<i>Unidad de medida</i>	<i>Valor</i>
Cuenca	Área	km <sup>2</sup>	4.97
	Perímetro	km	18.33
	Coefficiente de compacidad	-	2.32
	Factor de forma	-	0.07
	Longitud del lado mayor	km	8.59
	Longitud del lado menor	km	0.58
Cauce	Longitud del cauce principal	km	7.56
	Cota mayor	msnm	530.00
	Cota menor	msnm	164.00
	Pendiente del cauce	m/m	0.05
DEM cuenca	Pendiente de la cuenca	m/m	0.09
	Cota media de la cuenca	msnm	275
Cuenca y cauce	Densidad del drenaje	km/km <sup>2</sup>	2.59
Cauces	Número de orden de los cauces	-	3

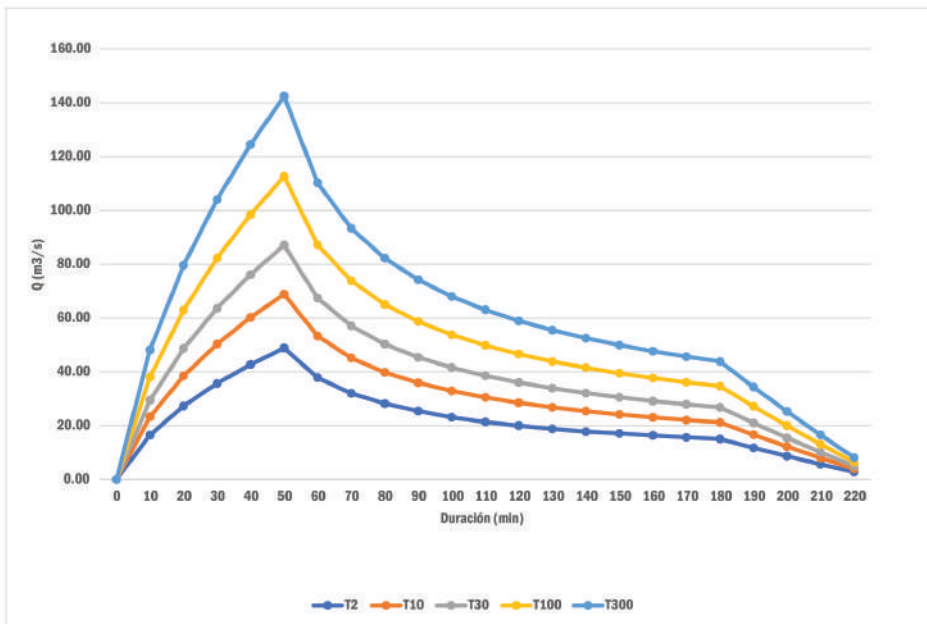
Fuente: Elaborada con los resultados de los parámetros morfométricos calculados con las ecuaciones presentadas en la tabla 1.

Figura 8. *Curva IDF para cada periodo de retorno (T)*

Fuente: Elaborada con base en el procesamiento estadístico que se realizó al registro de precipitaciones de la Estación Meteorológica proporcionados por INETER.

Del procesamiento para determinar cuánto es el caudal en que la cuenca se satura, utilizando el Hietograma de Precipitación de lluvia proyecto, se obtuvo el resultado de  $30.65 \text{ m}^3/\text{s}$  en 50 minutos con un Coeficiente de escorrentía de 0.61, tomado de Chow *et al.* (1994), por ser una cuenca mayormente rural y con pendientes de 5%. Se calcularon las intensidades y los caudales para cada 10 minutos y el resultado del Método Isócronas, para los periodos de retorno  $T$  (véase figura 9).

Figura 9. Caudales para los periodos de retorno



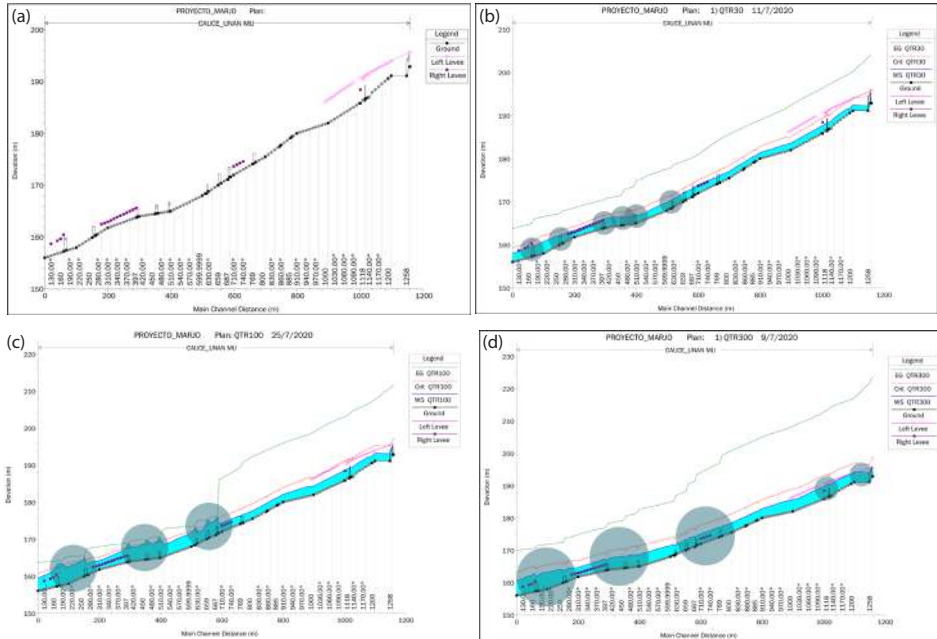
Fuente: Elaborada con los resultados del cálculo de los caudales máximos utilizando la ecuación E21 utilizando los datos de entrada del registro de precipitaciones proporcionado por INETER.

Modelar el comportamiento del flujo y de la geometría del canal revestido que forma parte del drenaje principal de la microcuenca de interés a partir de los caudales máximos calculados en la sección anterior que corresponde a  $87.08 \text{ m}^3/\text{s}$  para un  $T$  de 30 años;  $112.62 \text{ m}^3/\text{s}$  para un  $T$  de 100 años, y  $142.41 \text{ m}^3/\text{s}$  para  $T$  de 300 años, dio como resultado perfiles longitudinales y perfiles 3D (no se presentan en este documento), para cada uno de los periodos de retornos analizados, también se presentan un perfil



longitudinal considerando condiciones sin lluvia para su posterior discusión (véase figura 10).

Figura 10. Perfiles longitudinales del cauce modelado



Notas: Perfiles longitudinales extraídos de HEC-RAS que muestran las alturas del flujo que se han alcanzado con cada uno de los caudales introducidos en este modelo. (a) muestra el comportamiento del cauce sin flujo; (b) muestra el comportamiento del flujo en el cauce con un caudal de 87.08 m<sup>3</sup>/s para un  $T$  de 30 años; (c) muestra el comportamiento del flujo en el cauce con un caudal 112.62 m<sup>3</sup>/s para un  $T$  de 100 años, y (d) muestra el comportamiento del flujo en el cauce con un caudal 142.41 m<sup>3</sup>/s para  $T$  de 300 años.

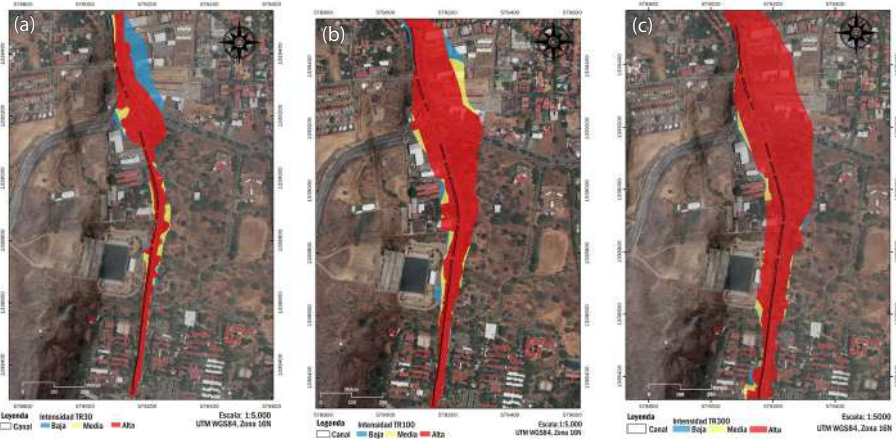
Otro de los resultados de este análisis son los mapas generados en RAS-Mapper que imágenes ráster de la simulación del flujo para los diferentes periodos de retorno, en cuanto a profundidad, velocidad y extensión de la inundación. En cuanto a la extensión de la inundación, se hace un ajuste o corrección espacial considerando la topografía de la zona debido a que está enmarcada por la extensión de las secciones transversales, mostrando que el área que abarcado por la inundación por cada periodo de retorno corresponde a  $T_{30} = 0.081 \text{ km}^2$ ;  $T_{100} = 0.134 \text{ km}^2$ , y para  $T_{300}$  fue de  $0.178 \text{ km}^2$ .

Los ráster de profundidad se clasifican en tres clases; valores menores a 0.5 m de profundidad, valores entre 0.5 m y 2 m y la tercera clase compren-

de los valores de 2 m en adelante. Luego se convirtieron a formato vectorial y se hicieron los ajustes mencionados anteriormente relacionados con la extensión de la posible extensión de la inundación. Los ráster de Velocidad se clasificaron en 7 clases: las que comprenden los valores menores o iguales a 0.99; de 1 a 1.99; de 2 a 2.99; de 3 a 4.99; de 5 a 9.99; de 10 a 14.99, y la final 15 a más.

El resultado de unir estas dos variables Profundidad y Velocidad, se obtuvo una nueva capa de información  $V \times D$ , la que sirvió junto a las dos primeras para definir niveles de Intensidad para cada periodo de retorno.). Luego se evalúan las condiciones propuesta por Werren y Lasri (2014) y se producen los Mapas de Amenaza por Inundación para cada periodo de retorno (véase figura 11).

Figura 11. Mapas de Intensidad para cada periodo de retorno a escala 1:5,000



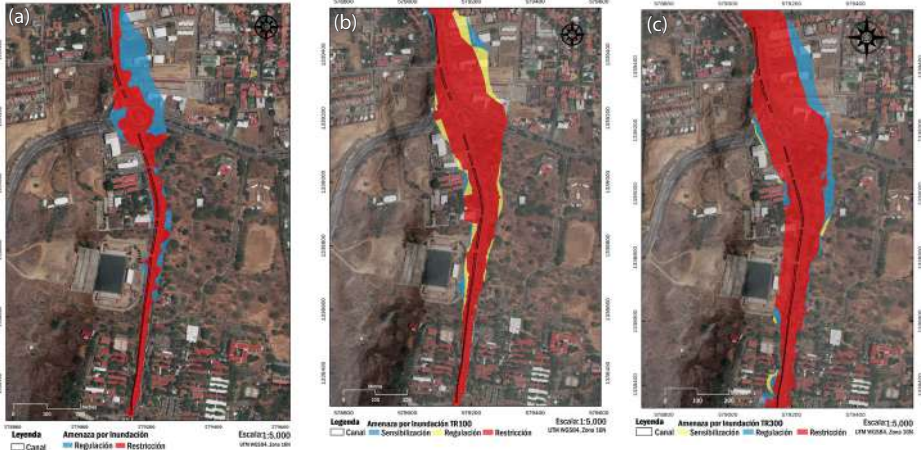
Nota: (a) Intensidad para  $T_{30}$ , (b) Intensidad para  $T_{100}$  y (c) Intensidad para  $T_{300}$ .

Fuente: elaboradas con base en los resultados obtenidos del procesamiento hecho en HEC-RAS y ArcMap.

Posteriormente se aplica la condicional a la Intensidad presentada con cada periodo de retorno y se contrastan con la Matriz de Amenaza por Inundación para crear los Mapas de Amenaza para periodo de retorno, como se muestra en la figura 12.

- i)  $V \times D > 2$
- ii)  $V \times D > 0.5$  AND  $V \times D \leq 2$
- iii)  $V \times D \leq 0.5$

Figura 12. Mapas de amenazas por inundación para cada periodo de retorno



Nota: (a) Mapa de amenaza de inundación para  $T_{30}$ , (b) Mapa de amenaza de inundación para  $T_{100}$  y c) Mapa de amenaza para  $T_{300}$ .

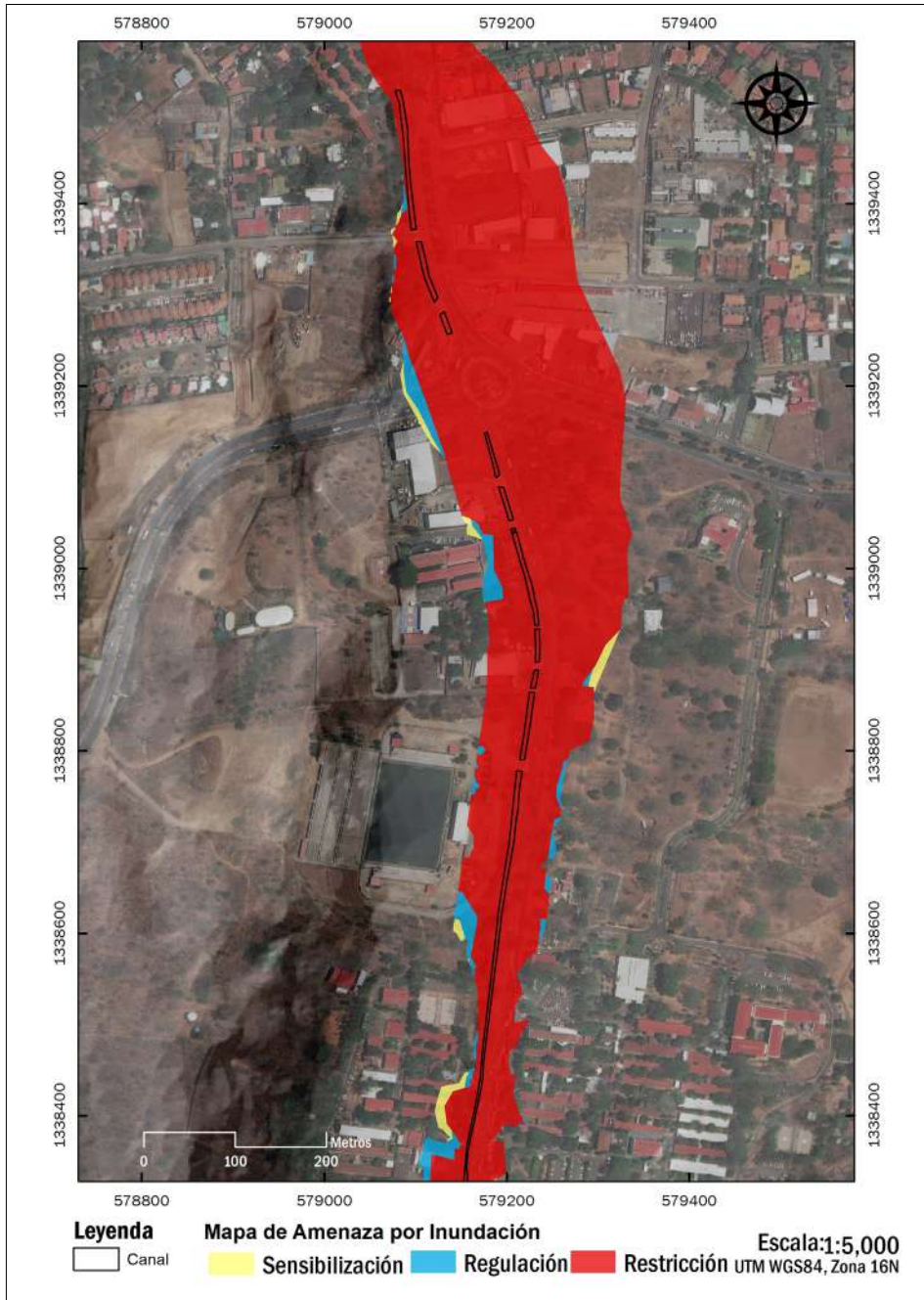
Fuente: Elaboradas con base en los resultados obtenidos del procesamiento hecho en HEC-RAS y fueron diseñadas en ArcMap.

Como resultado final de este proceso se consideran los 3 mapas resultantes, considerando el valor más crítico y se construye el Mapa de Amenaza por Inundación para zona de estudio (véase figura 13).

Las características morfométricas de la cuenca delimitada para acotar este estudio muestran que se trata de una microcuenca de forma oblongada, inclusive por encima del rango máximo para este tipo de forma de cuenca. Por el tamaño de con un área total de 4.96 km<sup>2</sup> se categoriza como una microcuenca. La pendiente del cauce corresponde a un 5% y la pendiente de la cuenca a un 9%. La altura media se encuentra en los 275 msnm. Considerando el tipo de sistema de drenajes, se puede decir que es de tipo endorréica, debido a que drena a un drenaje mayor, por ser parte de la microcuenca 2 de la subcuenca sur del lago de Managua, pero no llega al mar, más bien drena a otro drenaje y este a su vez al lago.

En cuanto al análisis de las pendientes, las de 8-15%, ligeramente inclinada a moderadamente empinada, cubren la mayor área de la microcuenca en estudio, ocupando el 34.03% del área total, correspondiendo al 1.69 km<sup>2</sup>. Otro rango de pendientes dominantes es de 4-8%, ligeramente inclinada, el que cubre el 28.27% correspondiendo a 1.40 km<sup>2</sup>. En tercer lugar, se puede

Figura 13. Mapa de amenaza por inundación para los alrededores del recinto universitario Rubén Darío



Fuente: Esta figura es resultado del procesamiento llevado a cabo por el autor a través del software de sistema de información geográfica con base en los datos obtenidos del análisis en HEC-RAS.

observar otro rango de pendientes que corresponde a las pendientes entre 0-4%, que cubre el 21.14% de área total que afecta a 1.05 km<sup>2</sup>. El resto de los rangos de pendientes se puede encontrar con valores menos significativos.

Además, se determinó que la cota media se encuentra a 275 msnm, este dato se obtuvo del análisis de la curva hipsométrica. Lo que indica que a partir de esta cota hacia abajo la microcuenca se aplana rápidamente con ligeros rasgos de concavidad. Sin embargo, de la cota media hacia arriba, hay un incremento de las alturas por encima de esta, muestra rasgos de convexidad y además ocupa la mayoría del área total.

De los caudales máximos obtenidos para cada periodo de Retorno 2, 10, 30, 100, 300, se tomó la decisión de que solamente modelar las inundaciones para los últimos 3 periodos de retorno, ya que los cambios que pudieron notarse entre  $T_2$  y  $T_{10}$ , no sería significativos. Del modelo hidráulico 2D se resalta los perfiles longitudinales de la figura 10. En la que se puede apreciar la comparación de cuando el canal no tiene flujo y los 3 escenarios correspondiente a cada periodo de retorno. En la figura 10b, muestra el comportamiento del flujo en el cauce con un caudal de 87.08 m<sup>3</sup>/s para un  $T$  de 30 años y se aprecia el efecto de desborde de los puentes agregados al diseño original del canal.

En la figura 10c se muestra el comportamiento del flujo en el cauce con un caudal 112.62 m<sup>3</sup>/s para un  $T$  de 100 años, nuevamente los puntos de desbordamiento del cauce ocurren en el lugar donde fueron instalados puentes; de igual manera, se presenta en la figura 10d, la cual muestra el comportamiento del flujo en el cauce con un caudal 142.41 m<sup>3</sup>/s para  $T$  de 300 años. Se puede interpretar el efecto de compresión que los puentes ejercen en el flujo que circula por el canal. Es notable en el análisis para 300 años que existe un desbordamiento en todos los puentes y en zonas de debilidad asociado a topografía del lugar. También se puede interpretar que incluso para caudales menores a los calculados, se pueden producir desbordamientos asociados al efecto que generan los puentes. Es necesario mencionar que la mayoría de estos puentes han sido construidos posterior a la del canal y que varios de ellos han reducido su altura y efectividad genera un desbordamiento de gran volumen, considerando las condiciones normales para las que fue diseñado originalmente.

La simulación reveló que las zonas más susceptibles de sufrir inundaciones son las situadas a lo largo y a los alrededores del canal. Es importante mencionar que este método no está enfocado en determinar propiamente si la Amenaza es alta, media o baja, sino más bien está enfocado en procurar una planificación territorial adecuada con el objetivo de reducir los Riesgos de Desastres teniendo en cuenta las recomendaciones que es análisis ofrece, sobre todo para entornos urbanos. Por tal razón, los valores que se asignan dependiendo de las condiciones son: Sensibilización, Regulación y Restricción para construir en zonas amenazadas por una inundación de acuerdo a la matriz sugerida por Werren y Lasri (2014). Las zonas más cercanas al propio canal representan las zonas en las que el flujo alcanza mayor velocidades y mayor profundidad lo que podía ser perjudicial para las personas que circulan en la zona, dado que hay dos universidades a su alrededor, un centro de aplicación preescolar y muchas empresas. También eventualmente es zona de gran concentración de personas por el Estadio Nacional de Fútbol.

Por otro lado, esta zona en los últimos años ha venido teniendo un incremento de empresas de tecnología, concesionarias de vehículos, de entretenimiento y bienestar (gimnasios, peluquerías, alimentos y estaciones de servicio, entre otros) además que la vía que atraviesa la rotonda de Este a Oeste es una de las principales vías alternas de la ciudad. Toda esta infraestructura también puede verse dañada por el flujo que podría circular si se alcanzará estos caudales.

Un método similar aplicaron Echogdali *et al.* (2022) utilizando la combinación de HEC-RAS y SIG para modelar la cuenca de Seyad, en comparación con el predijeron la probabilidad de que se produzcan inundaciones en diferentes momentos y determina la intensidad de la inundación y contrastaron los resultados con otro método, el Índice de Riesgo de Inundación (FHI) que consiste en análisis multicriterio para evaluar las zonas propensas al riesgo de inundación, utilizando seis parámetros físicos: permeabilidad, pendiente, distancia a los ríos, uso del suelo, densidad de drenaje y acumulación de caudal. Se calcula un peso a partir del método del proceso de jerarquía analítica y se aplica a cada parámetro, lo que permite establecer niveles de peligro de inundación sin mostrar la profundidad del agua. En ambos enfoques, se realizaron seis simulaciones con periodos de retorno de 10, 20,

50, 100, 200 y 500 años. La simulación reveló que las zonas más susceptibles de sufrir inundaciones son las situadas a lo largo del Wadi Seyad.

De igual manera el estudio realizado por Werren *et al.* (2016) fue llevado a cabo en un contexto de inundaciones fluviales, dando como resultados la zonificación en los cuales las inundaciones pudieran tener mayor o menor impacto. Al diferir del contexto pluvial brinda a este estudio mayor pertinencia por posicionarlo como uno de los pocos estudios realizados con esta metodología para este contexto a esta escala a detalle.

## Conclusiones

Queda en evidencia que el desarrollo comercial trae consigo acciones que aumentan los Riesgos de Desastres si no se planifican correctamente. La actividad humana muchas veces en pro del desarrollo común de la comunidad convierte a elementos que antes no lo estaban en elementos expuestos y aumentan las probabilidades de un fenómeno se convierta en desastres. Como ha sido la construcción de puentes para habilitar las entradas y salidas dentro del diseño original de cauce. Las cajas puentes de la mayoría de los puentes nuevos instalados fueron construidas dentro del cauce, disminuyendo así la capacidad original con la que fue diseñado un construido originalmente, creando puntos de desbordamiento como se puede observar en la figura 10.

Por tanto, con base en los resultados obtenidos, es de importancia tomar en cuenta este estudio para gestionar el ordenamiento territorial, la cobertura y usos de la tierra en esta zona con el fin de disminuir las probabilidades de que ocurra un desastre, ya que la cartografía con base en la simulación indican que la mayor parte de los elementos expuestos a la amenaza de Inundación se ubican en zona de restricción, especialmente la infraestructura emplazada al Este del canal y al Noreste del mismo.

En Nicaragua, se ha establecido una guía para la Elaboración de Mapas de Inundaciones Fluviales que contempla umbrales similares al propuesto por Werren y Lasri (2014), sin embargo este método está diseñado para flujos constantes. Este estudio constituye una propuesta de metodología para abordar el análisis de las inundaciones pluviales en zonas urbanas y a

una escala a detalle. De manera es de utilidad para estudiar problemáticas en localidades pequeñas considerando sus propios contextos, características y limitaciones. Sin duda alguna esto trae aportes para la gestión de riesgos de desastres en la ciudad.

Es importante mencionar al finalizar este trabajo que como parte del proceso se enfrenta a retos que superar, para este estudio los desafíos encontrados fue la calidad de los datos. Se hizo uso del régimen de precipitaciones disponible de la Estación Meteorológica del Aeropuerto Internacional “Augusto C. Sandino”, pero su ubica a 14 km del área de estudio, ya que no se pudo obtener los datos de estaciones más cercanas que pudieran brindar mayor precisión a los resultados.

Otro de los desafíos, fue contar un Modelo de Elevación Digital (DEM) de al menos 50 cm de resolución, solamente se tuvo acceso a uno de 2 m. Por ahora en Nicaragua el uso libre de Drones está regulado por lo que no es factible considerar ese método para obtener información para el modelamiento del terreno.

Sin embargo, la experiencia del análisis deja mucho aprendizaje en cuanto a metodologías para el análisis de la Amenaza de Inundación en zonas urbanas que también forman parte de cuencas rurales, en la que se debe tener en cuenta, las condiciones en la partes medias y altas de la cuenca a la que pertenece la zona de estudio. Por otro lado, plantea una perspectiva distinta de como evaluar las inundaciones en este país, desde el enfoque de la concientización, regulación y restricción para emplazarse en las zonas propensas a enfrentar este fenómeno.

## Reflexiones

Los resultados de este trabajo nos traen a reflexionar sobre qué tan efectiva está siendo la gestión de riesgos de desastres de inundación en general. En Nicaragua existe una fortaleza como bien se mencionó en cuanto a organización y normativa. Esto ha llevado al país a ser un referente en la región en cuanto a la gestión de riesgos de desastres producidos por diferentes tipos de fenómenos naturales.



Sin embargo, aún queda un camino por recorrer relacionado la concientización de las personas y la transferencia de los riesgos. El desarrollo urbano trae consigo muchos beneficios para la población, sin embargo, desde el punto de vista de los riesgos en ocasiones incrementa al menos uno de los factores del riesgo. Si consideramos que el riesgo de desastres es el producto de la amenaza por la vulnerabilidad por los elementos expuestos.

De acuerdo con entrevistas realizadas en complemento a este estudio, uno de los entrevistados mencionó que hace unos muchos años atrás en esta zona de la ciudad, había un microclima, sobre todo por estar cercano a la reserva de Mokorón al suroeste de la zona de estudio. La construcción de nuevas edificaciones ha provocado la disminución de la mancha boscosa incrementando la temperatura local.

Sumado a esto, en la parte media y alta de la cuenca con pendientes de moderadas a altas, han ocurrido cambios en los uso y cobertura de la tierra, cambiando de zona boscosa a zona agrícola. Todo esto genera que la tasa de infiltración disminuya y aumente la escorrentía en velocidad y volumen, sobre todo para partes media y baja de la cuenca, donde se encuentra nuestra área de estudio.

En el contexto de este análisis, el desarrollo de esta zona que se evidencia con nuevas edificaciones sobre todo en el costado oeste del cauce, por lo que requiere construir puentes para su ingreso. Esto ha traído modificaciones a la geometría inicial del cauce que circula por la zona debido a la construcción de caja puente sin tener en cuenta que efecto pueda generar esto en el flujo pluvial en la época de lluvia. Esto ha resultado en el desbordamiento del cauce en esos puntos de compresión del flujo.

Esto lleva a la reflexión sobre la efectividad de los reglamentos establecidos. La aplicación y efectividad no depende solamente de los reglamentos per se. Si no más bien, de la concientización de los actores involucrados en estos procesos. El conocimiento de los riesgos como parte del antes en el proceso de la gestión de riesgos es de gran importancia. Lo que lleva a pensar en que si los estudios de amenaza o estudios de riesgos de desastres están al alcance de todos los pobladores. ¿La transferencia de conocimiento está siendo efectiva y está teniendo impacto en todos los sectores de la sociedad?

## Reconocimientos

Este estudio se basa en un proyecto realizado en el marco del Certificado de Especialización para la Evaluación y Gestión de Riesgos Geológicos y Climáticos de la Universidad de Ginebra (CERG-C) (<https://www.unige.ch/sciences/terre/CERG-C/>), con el asesoramiento del Prof. David Consuegra.

Quisiera destacar un reconocimiento a la UNAN-Managua, a la Dra. Maribel Avendaño, Vicerrectora de Investigación en el momento en que se llevó a cabo esta investigación, a la Dra. Heyddy Calderón y al MSc. Horacio Ulloa, directora y subdirector del Instituto de Geología y Geofísica por apoyar este trabajo de investigación.

También quisiera agradecer el apoyo brindado por Norwing Acosta y Walid Essiarab, que ha sido muy significativo para este trabajo. A mis compañeros y amigos, quienes han aportado en diferentes formas al desarrollo de este proyecto. Elliot Pérez, Erick Obando, Wilmor Arce, Weslin González, Karolina D'Trinidad, Osmany Calero, Karina Quiroz, Darling Castro y Keila Ballesterro.

## Bibliografía

- ANA. (2002). *Codificación de cuencas hidrográficas por el método de Otto Pfafstetter*.
- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa. [http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoren/HIDRO/Fundamentos\\_de\\_hidrologia\\_de\\_superficie\\_-\\_Aparicio.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoren/HIDRO/Fundamentos_de_hidrologia_de_superficie_-_Aparicio.pdf)
- Apel, H., Merz, B., y Thielen, A. H. (2008). Quantification of uncertainties in flood risk assessments. *International Journal of River Basin Management*, 6(2), 149-162. <https://doi.org/10.1080/15715124.2008.9635344>
- Benites Ramos, J. M., Sevilla Gildemeister, J. C., Echevarría Suárez, W. J. y Campos Delgado, A. (2015). *Actualización de unidades hidrográficas y codificación de fuentes de agua superficial en ámbitos de administraciones locales de agua*. Ministerio de Agricultura y Riego del Gobierno de Perú. [http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/memoria\\_descriptiva\\_a\\_uh\\_cas\\_ala\\_barranca.pdf](http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/memoria_descriptiva_a_uh_cas_ala_barranca.pdf)
- Bermúdez, R. G. (2012). *Variación de las curvas de intensidad-duración-frecuencia de las lluvias en la ciudad de Salta y alrededores en dos momentos distintos del tiempo*. [https://www.academia.edu/35522448/Variación\\_de\\_las\\_Curvas\\_de\\_Intensidad\\_](https://www.academia.edu/35522448/Variación_de_las_Curvas_de_Intensidad_)

- Duración\_Frecuencia\_de\_las\_lluvias\_en\_la\_ciudad\_de\_Salta\_y\_alrededores\_en\_dos\_momentos\_distintos\_del\_tiempo\_Salta\_República\_Argentina\_junio\_2015\_
- Campos Aranda, D. (1998). Estimación estadística de la precipitación máxima probable en San Luis Potosí. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13(3), 45-66.
- Campos, D. (1998). *Procesos del ciclo hidrogeológico*. Universitaria Potosina. <https://ninive.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3331>
- CEPREDENAC. (2017). *Política centroamericana de gestión integral de riesgo de desastres*. <http://cepredenac.org/wp-content/uploads/2021/02/PCGIR-informe.pdf>
- Chequere, W. (1989). *Hidrología para estudiantes de Ingeniería Civil*. <http://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/28689/hidrologia.pdf>
- Chow, V., Maidment, D. y Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada (Trad. M. Suárez)*. McGraw-Hill.
- Clark, C. O. (1945). Storage and the unit hydrograph. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 110(1), 1419-1446. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0005800>
- Coordinación Nacional de Protección Civil de México. (2016). *LGPC y su reglamento en relación con el PIPC*. <https://escuelanacionaldeceramica.com>
- Cruz Romero, B., Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Carrillo González, F., y Téllez-López, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia (Universidad Autónoma de Aguascalientes)*, 64, 26-34.
- Di Baldassarre, G., Schumann, G., Bates, P. D., Freer, J. E., y Beven, K. J. (2010). Flood-plain mapping: a critical discussion of deterministic and probabilistic approaches. *Hydrological Sciences Journal*, 55(3), 364-376. <https://doi.org/10.1080/02626661003683389>
- Dottori, F., Salamon, P., Bianchi, A., Alfieri, L., Hirpa, F. A., y Feyen, L. (2016). Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping. *Advances in Water Resources*, 94, 87-102. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.05.002>
- Dourojeanni, A. y Jouravlev, A. (1999). *Gestión de cuencas y ríos vinculados con centros urbanos*. Cepal.
- Echogdali, F. Z., Boutaleb, S., Kpan, R. B., Ouchchen, M., Id-Belqas, M., Dadi, B., Ikirri, M., y Abioui, M. (2022). Flood hazard and susceptibility assessment in a semi-arid environment: A case study of Seyad basin, south of Morocco. *Journal of African Earth Sciences*, 196, 104709. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104709>
- González, A. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de la AGEN*, 38, 311-329.
- Gravelius, H. (1914). *Flusskunde: Göschen Verlagshan dlug Berlin* (Ed. I. Zavoianu) Elsevier.
- GRUN-Nicaragua. (2021). *Plan Nacional de Lucha contra la Pobreza (pp. 0-189)*. [https://www.pndh.gob.ni/documentos/pnlc-dh/PNCL-DH\\_2022-2026\(19Jul21\).pdf](https://www.pndh.gob.ni/documentos/pnlc-dh/PNCL-DH_2022-2026(19Jul21).pdf)
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2023). *Climate change 2023: AR6 synthesis report* (pp. 35-115) [Contribución de los equipos de trabajo I, II y III de la Sixth Assessment Report del IPCC [Núcleo del equipo de redacción, H. Lee and J. Romero (Eds.)]. IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

- Gumbel, E. J. (1941). The return period of flood flows. *The Annals of Mathematical Statistics*, 12(2), 163-190. <http://www.jstor.org/stable/2235766>
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Eos: Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350-361. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- INETER (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales). (1989). *Base cartográfica*.
- INETER. (2004). *Huracanes Nicaragua: 1892-2002*. <https://webserver2.ineter.gob.ni/desliza/met/huracanes-list.html>
- INETER. (2010). *Amenaza de inundaciones del área de Managua y sus alrededores*. 81-93.
- INETER. (2011). *Mapa de drenaje de la subcuenca sur del lago Xolotlán*.
- INETER y COSUDE (Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación). (2005). *Inundaciones fluviales: Mapas de amenazas: Recomendaciones técnicas*. INETER/COSUDE. [https://www.shareweb.ch/site/DRR/Documents/About%20Us/Publication\\_Nicaragua\\_InundacionesFluviales\\_MET-ALARN\\_2005.pdf](https://www.shareweb.ch/site/DRR/Documents/About%20Us/Publication_Nicaragua_InundacionesFluviales_MET-ALARN_2005.pdf)
- Jha, A. K., Bloch, R., y Lamond, J. (2012). Ciudades e Inundaciones: Guía para la gestión integrada del riesgo de inundaciones en ciudades en el siglo 21. Banco Mundial/GFDRR. [https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Situation\\_Report\\_156.pdf](https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Situation_Report_156.pdf)
- Ley No. 337. (2000, 7 de abril). Ley Creadora del Sistema Nacional para la Prevención, Mitigación y Atención de Desastres. *La Gaceta: Diario Oficial [de Nicaragua]*, (70). [http://legislacion.asamblea.gob.ni/Normaweb.nsf/\(\\$All\)/297E6E70F4940832062572020059E4CD?OpenDocument](http://legislacion.asamblea.gob.ni/Normaweb.nsf/($All)/297E6E70F4940832062572020059E4CD?OpenDocument)
- Luchisheva, A. A. (1950). *Practical hydrology*. Gidrometeoizdat [Rusia].
- Moncada, R., y Tórriz, C. (2017, 28 de septiembre). Una hora de lluvia bastó para colapsar a Managua. *La Prensa [Nicaragua]*. <https://www.laprensani.com/2017/09/28/nacionales/2304672-lluvias-provocan-inundaciones-varias-partes-managua>
- NASA. (2020). *Earth data search*. <https://search.earthdata.nasa.gov/search/>
- Ordenanza Municipal 03-2009. (2009, 28 de octubre). Reorganización de los distritos de Managua y su correspondiente delimitación. *La Gaceta*, 1-13. [http://legislacion.asamblea.gob.ni/Normaweb.nsf/%28\\$All%29/CB601E7A823CA0F2062576C600548A12?OpenDocument](http://legislacion.asamblea.gob.ni/Normaweb.nsf/%28$All%29/CB601E7A823CA0F2062576C600548A12?OpenDocument)
- Pappenberger, F., Dutra, E., Wetterhall, F. y Cloke, H. L. (2012). Deriving global flood hazard maps of fluvial floods through a physical model cascade. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11), 4143-4156. <https://doi.org/10.5194/hess-16-4143-2012>
- Rentschler, J. y Salhab, M. (2020). *People in harm's way: Flood exposure and poverty in 189 countries* (Policy Research Working Paper, 9447). Banco Mundial. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/34655>
- Robledo Molina, J. A. (2011). Metodología para la elaboración de mapas de amenaza por inundación. *Revista Científica ERIS*, 1(1), 1-9.
- Rosas, L. (2009). *Manual de procedimientos de delimitación y codificación de unidades hidrográficas*. UICN Sur.
- Sánchez San Román, F. J. (2011). *Hidrograma unitario de Clark*. Universidad Salamanca. <http://hidrologia.usal.es>
- Schumm, S. A. (1977). *The fluvial system*.

- Sy, B., Frischknecht, C., Dao, H., Consuegra, D., y Giuliani, G. (2019). Flood hazard assessment and the role of citizen science. *Journal of Flood Risk Management*, 12, 1-14. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12519>
- Úbeda Trujillo, I. E. (2018). *Dinámica de coberturas de la tierra y su relación con los patrones de escorrentía superficial en la subcuenca III de la cuenca Sur del lago de Managua, Nicaragua*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.
- UNDRR (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres). (2015). *Marco de Sendai para la reducción del riesgo de desastres 2015-2030 (Resolución aprobada por la Asamblea General el 3 de junio de 2015)*. <https://www.undrr.org/es/framework-marco-de-sendai-para-la-reduccion-del-riesgo-de-desastres-2015-2030>
- UNDRR y CRED (Centro de Investigaciones sobre la Epidemiología de los Desastres). (2020). *El costo humano de los desastres: Una mirada a los últimos 20 años (2000-2019)*. UNDRR/CRED. <https://www.undrr.org/sites/default/files/inline-files/El%20Costo%20Humano%20de%20los%20Desastres%202000-2019.pdf?startDownload=true>
- Weiss, L. (1964). Ratio of true to fixed-interval maximum rainfall. *Journal of the Hydraulics Division*, 90(1), 77-82. <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0013210>
- Werren, G., y Lasri, M. (2014). *Cartographie du danger d'inondation: Guide pratique pour l'application de la méthode suisse au Maroc*. Universidad de Lausana. [https://www.shareweb.ch/site/Water/Documents/Cartographie%20du%20danger%20d%27inondation\\_FR.pdf](https://www.shareweb.ch/site/Water/Documents/Cartographie%20du%20danger%20d%27inondation_FR.pdf)
- Werren, G., Reynard, E., Lane, S. N., y Balin, D. (2016). Flood hazard assessment and mapping in semi-arid Piedmont areas: A case study in Beni Mellal, Morocco. *Natural Hazards*, 81(1), 481-511. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2092-0>
- World Economic Forum. (2019). *Informe de riesgos mundiales*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Zavoianu, I. (1985). Morphometry of drainage basins. Morphometry of Drainage Basins. <https://www.researchgate.net/publication/38982899>

