VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Simulation of surface runoff due to precipitation at the Juan Pablo II Headquarters (UG, Celaya-Salvatierra Campus)

Simulación de escurrimiento superficial por precipitación en la sede Juan Pablo II (UG, Campus Celaya-Salvatierra)

Xavier Chávez Cárdenas, María Cristina Moralez Garibay, José Manuel Ambriz López, José Iván Moralez García
Universidad de Guanajuato, Ingeniería Civil, Campus Celaya-Salvatierra.
x.chavez@ugto.mx[1], mc.moralez@ugto.mx[2], jm.ambrizlopez@ugto.mx[3], ji.moralesgarcia@ugto.mx[4]

Resumen

El presente estudio analiza el escurrimiento superficial generado por eventos de precipitación en la sede Juan Pablo II del Campus Celaya-Salvatierra de la Universidad de Guanajuato, con el propósito de identificar zonas de acumulación, riesgos de inundación y oportunidades para el aprovechamiento sostenible del agua de lluvia. Para ello, se desarrolló un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de alta resolución mediante fotogrametría con dron y se comparó con información LiDAR del INEGI. A partir de datos históricos de precipitación de la estación climatológica Celaya, se definió una lluvia de diseño de 60 mm asociada a un periodo de retorno de tres años. La simulación hidráulica se realizó mediante el software HEC-RAS en dos dimensiones, considerando un escenario impermeable que permitiera visualizar los patrones de flujo y almacenamiento superficial. Los resultados identifican áreas críticas de inundación y zonas con potencial para la implementación de estrategias de captación, recarga y gestión hídrica sostenible, contribuyendo a la reducción de riesgos y al uso eficiente del recurso hídrico.

Palabras clave: HEC-RAS; Simulación Numérica; Gestión Hídrica Sostenible; Modelo Digital de Elevaciones

Introducción

El estrés hídrico y las anomalías climáticas asociadas a la variabilidad espacial y temporal de la precipitación representan uno de los mayores desafíos para el desarrollo y mantenimiento de los entornos urbanos y educativos en México. En el Bajío mexicano y, específicamente, en el estado de Guanajuato, se enfrenta una creciente presión sobre los recursos hídricos impulsada por el dinamismo económico, el crecimiento poblacional y la sobreexplotación crónica de los acuíferos subterráneos. A esta problemática de escasez se suma un régimen pluviométrico contrastante, caracterizado por periodos de sequía prolongada que se alternan con eventos de lluvia convectiva intensa y de corta duración (Modelos predictivos del estrés hídrico y precipitación en el estado de Guanajuato, 2024).

En el municipio de Celaya, las condiciones edafológicas dominadas por suelos arcillosos de baja conductividad hidráulica favorecen que las precipitaciones intensas superen rápidamente la capacidad de infiltración del terreno. Esta dinámica genera volúmenes significativos de escurrimiento superficial que se desplazan a alta velocidad, provocando problemas recurrentes de encharcamiento, inundaciones temporales y procesos severos de erosión y pérdida de suelo. Paradójicamente, mientras las instalaciones universitarias sufren por la acumulación y el paso destructivo de estas escorrentías pluviales, se continúa extrayendo agua subterránea de pozos profundos para satisfacer las demandas cotidianas de riego de áreas verdes y mantenimiento de sanitarios (Cortez-Mejía, 2021).

Ante este panorama, resulta indispensable transitar hacia un modelo de gestión integral y sustentable del recurso hídrico en las instituciones de educación superior. La sede Juan Pablo II del Campus Celaya-Salvatierra de la Universidad de Guanajuato se posiciona como un espacio idóneo para implementar una estrategia de economía circular del agua. En lugar de proyectar costosas e invasivas obras civiles de alcantarillado subterráneo convencional para expulsar el agua del predio, el presente proyecto propone

caracterizar y simular el comportamiento hidrodinámico de la lluvia para captar, conducir y aprovechar el escurrimiento superficial (Torres-Benites, 2005).

El uso de herramientas avanzadas de modelación numérica y sistemas de información geográfica (SIG) permite reproducir de manera determinística las trayectorias del flujo, los tirantes de acumulación y los puntos críticos de erosión bajo diferentes escenarios de lluvia de diseño. Al calibrar estos modelos con datos altimétricos de gran precisión, es posible diseñar intervenciones superficiales de bajo impacto que dirijan por gravedad el volumen escurrido hacia la infraestructura preexistente en el campus, como las cisternas de almacenamiento, la planta de tratamiento de aguas residuales y la red de riego. De este modo, se logra mitigar los riesgos de desastre por inundación y degradación del suelo, al tiempo que se maximiza el aprovechamiento del agua lluvia y se reduce de forma sustancial la dependencia del acuífero municipal (Mora Mariño & Ochoa, 2016).

La aproximación metodológica de este proyecto se basa en la integración de tecnologías de teledetección fotogramétrica de alta resolución con plataformas de simulación hidrológica e hidráulica. El estudio se desarrolló en diversas etapas operativas secuenciales diseñadas para transformar los datos físicos del terreno en propuestas de intervención hidráulica pasiva.

Zona de estudio

La sede Juan Pablo II del Campus Celaya-Salvatierra de la Universidad de Guanajuato se ubica al Sur de la ciudad de Celaya, Guanajuato (ver figura 1). En las coordenadas 308262.00 m E, 2266985.00 m N, zona 14, Q; de la proyección UTM (Universal Transverse Mercator). De acuerdo con mapa municipal de uso de suelo y vegetación (INEGI, 2025), el terreno de la sede Juan Pablo II es de uso agrícola de riego. Sin embargo, en la actualidad está cambiando significativamente por el desarrollo de conjuntos habitacionales (casas habitación)



Figura 1. Ubicación de la Sede Juan Pablo II con referencia a la ciudad de Celaya, Guanajuato.

Modelo Digital de Elevaciones, MDE

Con la finalidad de analizar el escurrimiento superficial causado por la lluvia dentro de la sede Juan Pablo II, a través de la simulación numérica, fue necesario generar el modelo digital de elevaciones, MDE. Se

obtuvieron dos MDE, uno obtenido directamente del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) y generado mediante la técnica LiDAR (Light Detection and Ranging) y otro creado a través de fotogrametría con dron.

La evidente diferencia que muestra la figura 2 entre los dos MDE radica en su resolución. Mientras que la resolución del MDE LiDAR es de 5 metros, la fotogrametría permitió genera un MDE con resolución de 20 centímetros. La precisión que se logró con el MDE a partir de fotogrametría permite identificar árboles, edificios, andadores, accesos vehiculares, estacionamientos, techumbres, etc. Respecto a las elevaciones, la diferencia entre los dos MDE se debe a que no se asignó una elevación real al generarse el MDE con fotogrametría, se asignó una elevación base arbitraria, pero este aspecto no altera los resultados, lo importante es la correcta caracterización de la superficie para una precisa simulación del escurrimiento.

Al analizar los MDE se observa que no hay una diferencia significante en la elevación del terreno en toda la superficie de la sede Juan Pablo II, pues esta diferencia oscila entre 2 y 4 metros; la diferencia mayor se tiene al considerar la elevación de los edificios.

Es importante aclarar que el INEGI maneja dos MDE LiDAR, uno de superficie y otro de terreno, el que se utilizó es el de superficie porque es importante para el proyecto considerar la influencia de la infraestructura y vegetación existentes con la precipitación.

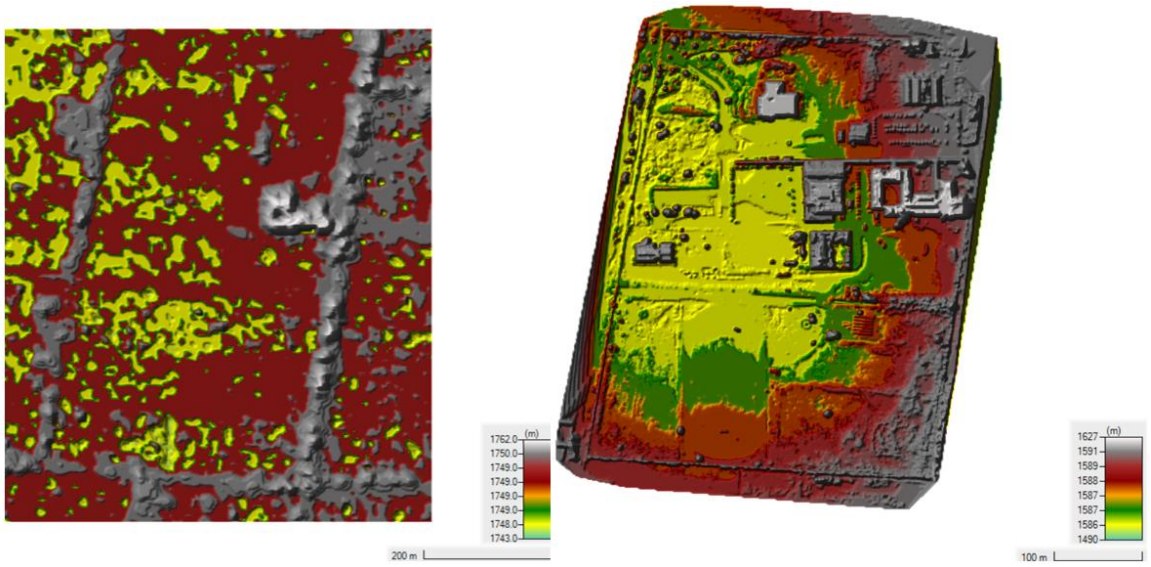


Figura 2. MDE LiDAR de INEGI (izquierda) y MDE de fotogrametría con dron (derecha).

La obtención de la topografía y la información de superficie del campus fue fundamental para la modelación precisa del escurrimiento superficial. Para ello, se utilizó el dron DJI Phantom 4 Pro V2.0. El proceso de vuelo se llevó a cabo siguiendo la siguiente metodología:

1. **Plan de vuelo**. La misión se diseñó y automatizó utilizando la aplicación DroneDeploy, ver figura 3. Se delimitó con precisión el polígono de vuelo para garantizar que el 100% de la superficie de la Sede Juan Pablo II del Campus Celaya-Salvatierra fuera cubierta.
2. **Altitud y resolución**. El vuelo se programó a una altitud promedio de 61 metros sobre el nivel del terreno. Esta altitud se seleccionó para lograr un equilibrio entre la resolución del suelo (GSD o Tamaño de Píxel en el Suelo) y la eficiencia del vuelo, permitiendo la identificación de detalles topográficos clave para el flujo de agua, guarniciones y pendientes sutiles.

3. **Configuración de traslape**. Se estableció un patrón de vuelo en cuadrícula con un traslape (geométrico longitudinal y transversal) alto y uniforme, la nos facilitaría los procesos de posprocesamientos, para la generación del modelo digital de superficie a partir de las imágenes capturadas durante el vuelo.



Figura 3. Plan de vuelo del dron.

Como parte del estudio de fotogrametría, también se generó un ortomosaico de la sede Juan Pablo II, la cual supera en precisión y actualización a las imágenes satelitales disponibles (ver figura 4).

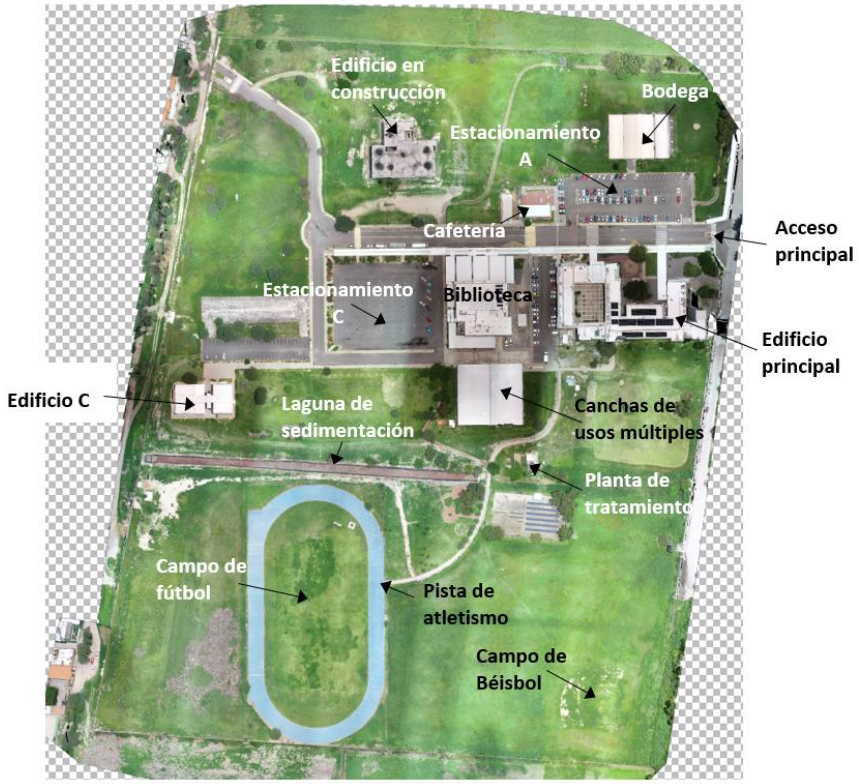


Figura 4. Ortomosaico de la sede Juan Pablo II

Precipitación

Se realizó un análisis de las precipitaciones máximas para seleccionar una precipitación significante que permita identificar con claridad el escurrimiento superficial. Se aplicó la metodología de los polígonos de Thiessen para saber cuál es la estación climatológica cuya área de influencia afecta la sede Juan Pablo II. La figura 5 muestra que la sede Juan Pablo II se encuentra en el área de influencia de la estación Celaya (SMN).

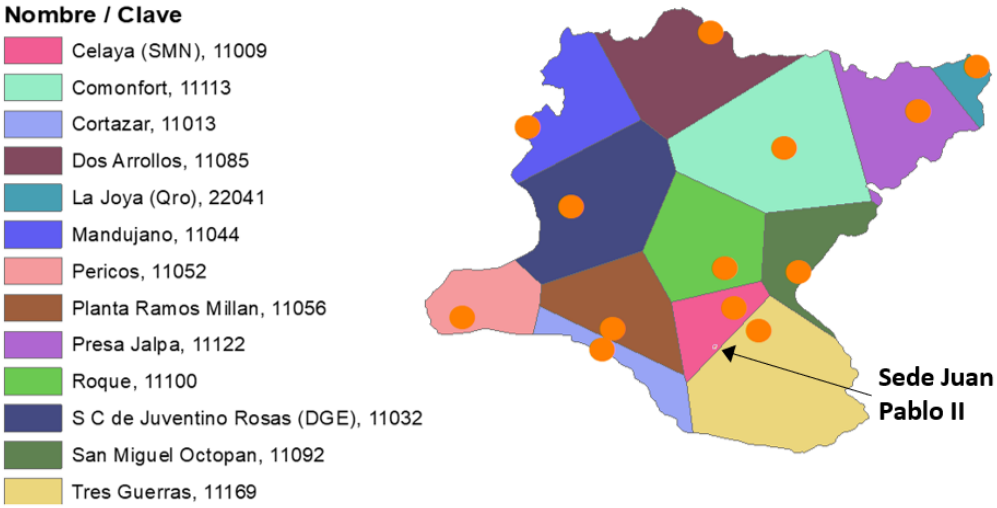


Figura 5. Polígonos de Thiessen para las estaciones climatológicas cercanas.

Se analizó el registro de la precipitación máxima diaria para cada mes desde 1922 a 2025 para la estación Celaya (SMN) en el sitio Web de CONAGUA. Se obtuvo la precipitación máxima diaria por año y se aplicó la metodología de Aparicio Mijares (2008) para determinar los periodos de retorno (Figura 6)



Figura 6. Gráfico del periodo de retorno (Tr) de la precipitación máxima anual

Modelado en HEC-RAS

HEC – RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System) es un software de modelación hidráulica que, a través del componte de cálculo de flujo permanente unidimensional, determina los perfiles de la superficie del agua para un flujo constante y gradualmente variado. El sistema de modelado HEC-RAS es capaz de simular flujos inestables unidimensionales, bidimensionales y combinados (unidimensionales y bidimensionales) a través de una red completa de canales abiertos, llanuras aluviales y abanicos aluviales., (US Army Corps of Engineers, 2022).

Este software además permite simular el escurrimiento superficial por precipitación por medio del flujo no estacionario bidimensional. Los requerimientos básicos para el modelado son los datos de flujo y geometría.

Datos de flujo.

El flujo se asigna a través de los hietogramas de precipitación, los cuales se elaboraron seleccionando una precipitación de 60 mm, correspondiente a un periodo de retorno (Tr) de 3 años de acuerdo con la figura 7. Al no contar con registros de las precipitaciones con sus duraciones asociadas, se designó una duración de 6 horas. Así pues, la precipitación modelada corresponde a una lluvia de 60 mm con duración de 6 horas, con la cual se busca tener un monitoreo claro del escurrimiento superficial, una precipitación más intensa (mayor lámina y menor duración) complicaría el seguimiento de los patrones de escurrimiento e inundación. La figura siguiente muestra el hietograma de la precipitación modelo.

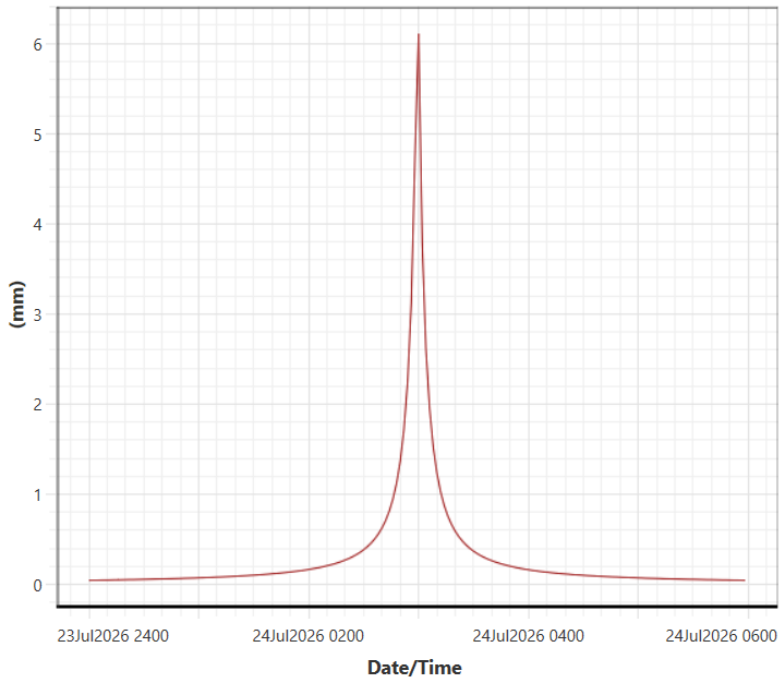


Figura 7. Hietograma sintético de la precipitación modelo.

Geometría.

La geometría delimita el área de estudio y la precisión de cálculo a través de la resolución de la malla generada. Primero se carga el MDE y sobre este se dibuja el perímetro que delimita el área de estudio, en este caso el perímetro corresponde al límite (la barda perimetral) de la sede Juan Pablo II. El área formada dentro del perímetro dibujado se configuró con retícula de 3 x 3 metros (Figura 8).

Se puntualiza que no se configuró flujo hacia fuera del área de estudio y se consideró a toda la superficie como impermeable. Por lo tanto, toda la precipitación queda acumulada dentro del área de estudio. Esto se realizó por dos motivos, el primero porque el objetivo principal es el identificar los patrones de escurrimiento y zonas de acumulación (inundación) y el segundo motivo es porque no se cuenta con mediciones del sitio para realizar una calibración y comprobación de los caudales y volúmenes resultantes.

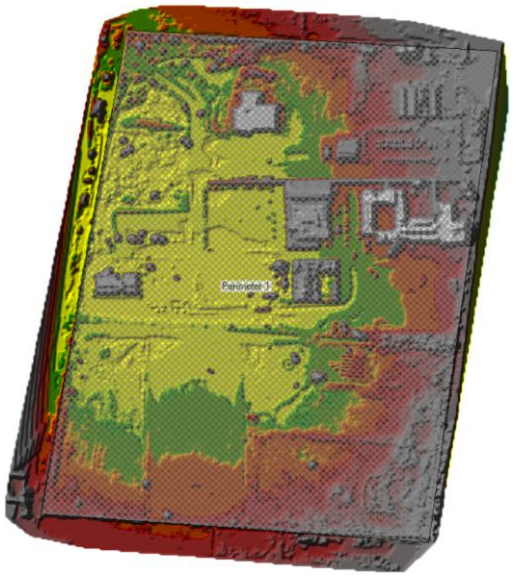


Figura 8. Perímetro y retícula del área de estudio.

Simulación y análisis de resultados

Para el cálculo de la simulación del escurrimiento superficial se aplicó la ecuación de aguas someras con un intervalo de tiempo de 1 segundo ajustado con dinámicamente con el número de Courant. Las figuras 9 y 10 se presentan como los resultados obtenidos.

En la figura 9 se aprecia el patrón de inundación después de 30 minutos de lluvia, en una etapa inicial de la precipitación modelo. Esta imagen nos permite ubicar las zonas más rápidamente afectadas por el escurrimiento. Recordado que se está evaluando un panorama impermeable, por lo tanto, es posible que estos patrones de inundación no se manifiesten en la realidad, porque en la superficie natural se tiene inundación y en la superficie artificial se debe de contar con obra de drenaje. Sin embargo, en casos de saturación y/o obstrucción de drenaje las zonas indicadas serían vulnerables.

La figura 10 muestra el patrón de inundación debido al escurrimiento superficial a las 3 horas y 45 minutos, después de pasar el pico de la precipitación modelo. El patrón evidencia un escenario más afectado, en el cual el azul intenso destaca las zonas con mayor profundidad o lámina de agua, la cual es de 1 metro aproximadamente. Si estas zonas de mayor profundidad se ubican terreno naturas, se puede analizar posibilidad de generar una zona de recarga del acuífero, pero si se ubica en zona con desarrollo de

infraestructura, como en la esquina superior izquierda del estacionamiento C, donde se tiene la vialidad vehicular, se debe de garantizar el correcto drenaje para evitar daños.

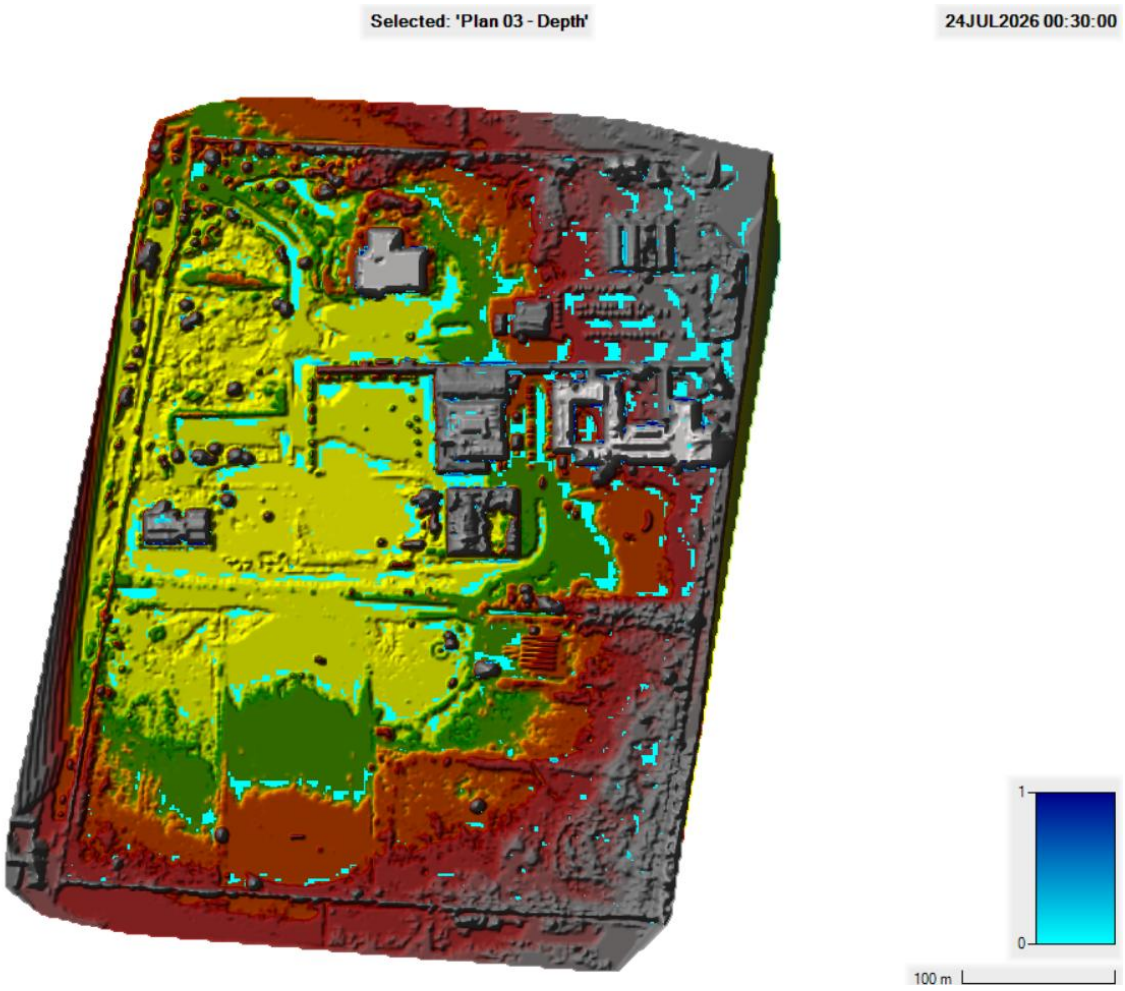


Figura 9. Escurrimiento simulado a los 30 minutos

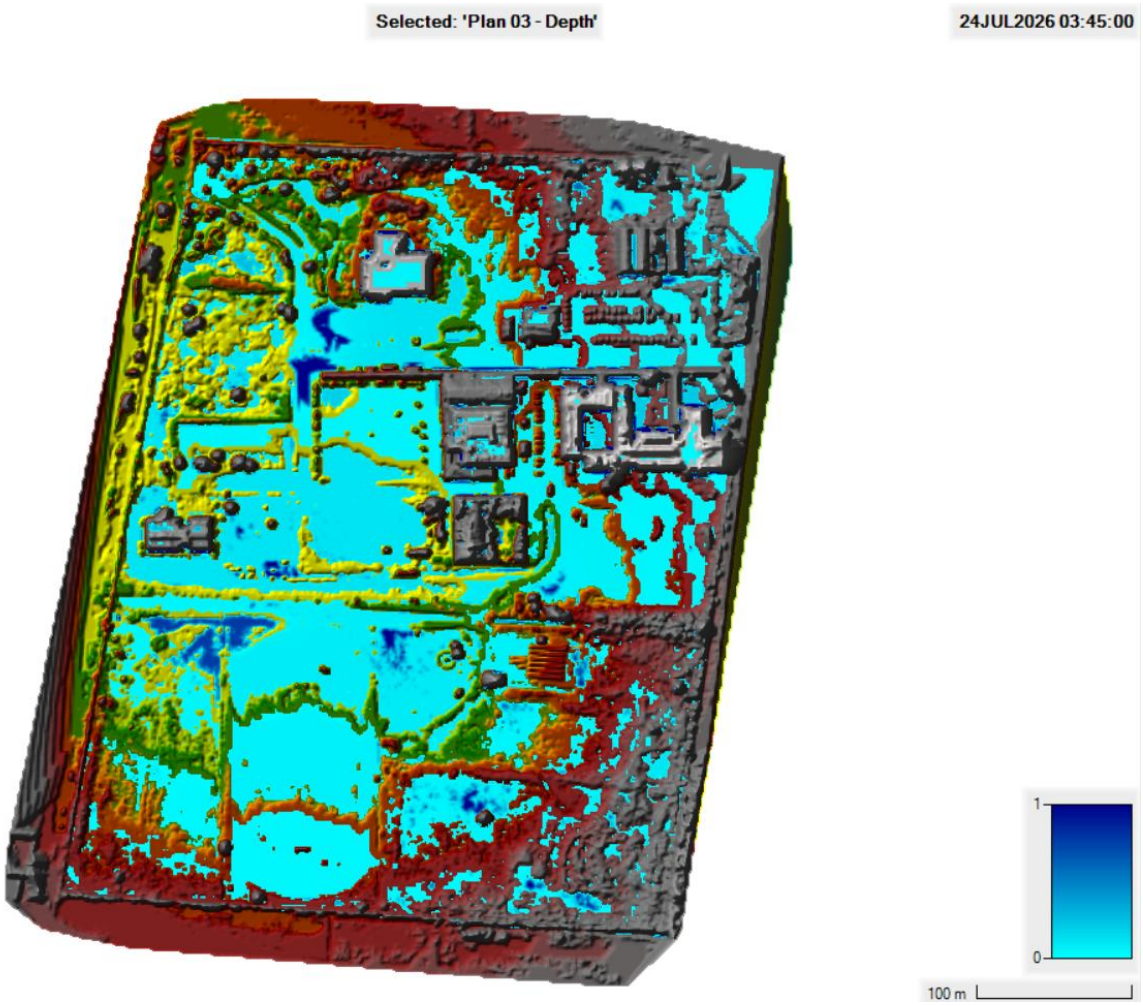


Figura 10. Escurrimiento simulado a las 3 horas y 45 minutos

Conclusiones

El proyecto se culmina satisfactoriamente en su etapa inicial obteniendo resultados que muestran un patrón del flujo coherente que resalta con claridad las zonas de prioridad, zonas que pueden catalogase como zonas de riesgo o como zonas con potencial en la gestión hídrica sostenible.

Para que el proyecto alcance el objetivo ideal de llegar a plantear propuestas de intervención hidráulica pasiva, es necesario contar con mediciones en campo para calibrar el modelo y considerar adecuadamente parámetros como la infiltración y rugosidad, con lo cual se tengan resultados no solo visuales, si no también numéricos de caudal y volumen, con los cuales proponer y diseñar obras de seguridad y aprovechamiento como drenajes y zonas de recarga de acuíferos.

El trabajo realizado deja un MDE y un ortomosaico detallados de la sede Juan Pablo II que puede ser de utilidad en diversos ámbitos. Además, los patrones de inundación por escurrimiento son utilidad para la planeación del desarrollo de la sede.

Bibliografía/Referencias

Aparicio Mijares, Francisco J. (2008). Fundamentos de Hidrología de superficie (pp. 167). Limusa.

Fernández Rodríguez, C. Z., & Gallardo Aguirre, D. A. (2026). *Estudio preliminar para la implementación de un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias en instituciones educativas oficiales de Bogotá con población estudiantil entre 600 y 1200 estudiantes* [Tesis de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional RIUD. https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/4153c2fd-2f5f-4c59-ae62-5029f1201022/content

Flö, V. (s.f.). *Uso de modelos digitales de elevación y de sistemas de información geográfica en la modelación hidrológica* [Archivo PDF]. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/48968726/Uso_MDE_e_sistema_sig-libre.pdf

INEGI,2025.https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/uso_suelo/794551157619_geo.pdf

Manjarrez Hernández, D. (2020). *Propuesta de implementación de un sistema de captación de agua de lluvia (SCALL, en la Facultad de Odontología de la Universidad Autónoma del Estado de México* [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México]. Repositorio Institucional UAEMex. https://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/111970

Modelos predictivos del estrés hídrico y precipitación en el estado de Guanajuato. (2024). JÓVENES EN LA CIENCIA, 29, 1-7. https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/4622

Mora Mariño, W., & Ochoa, R. G. (2016). *Modelamiento de zonas de inundación por medio de las herramientas HEC-RAS, GEO-RAS y ArcGIS, para el sector comprendido entre los municipios de Corrales - Paz de Rio a lo largo del rio Chicamocha, en el departamento de Boyacá* Repositorio Institucional UPTC. https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/4b35b549-2d6d-4623-9307-3d3c11f09324/content

Ortega Hernández, A. (2021). *Estimación del escurrimiento superficial utilizando sistemas de información geográfica, caso de estudio Ciudad de Guanajuato*, Repositorio Institucional UG. http://repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/5633/1/Estimaci%c3%b3n%20del%20escurrimiento%20superficial%20utilizando%20sistemas%20de%20informaci%c3%b3n%20geogr%c3%a1fica%2c%20caso%20de%20estudio%20Ciudad%20de%20Guanajuato.pdf

P. Cortez-Mejía; V. Tzatchkov; J.M. Rodríguez-Varela; O.J. Llaguno-Guilberto, Ingeniería del agua (2021) 25 (1): 15–36.https://doi.org/10.4995/ia.2021.13570

Torres-Benites, E., Mejía-Sáenz, E., Cortés-Becerra, J., Palacios-Vélez, E., & Exebio-García, A. (2005). Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México. Agrociencia, 39(5), 481-490.

US Army Corps of Engineers (2022). HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual, Version 6.0. https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/latest