

Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el Análisis Hidrológico

AUTOR

MAYERLY BECERRA CONTRERAS

Director

OSCAR HERNÁNDEZ PARADA

Mag. Ingeniería civil y obras hidráulicas

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa Ingeniería Civil

Pamplona

2024

Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el Análisis Hidrológico

AUTOR

MAYERLY BECERRA CONTRERAS

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

OSCAR HERNÁNDEZ PARADA

Mag. Ingeniería civil y obras hidráulicas

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa Ingeniería Civil

Pamplona

Año

2024

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad de Pamplona por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios y por el apoyo constante y las herramientas que me proporcionaron para alcanzar este importante logro. A mis profesores que fueron los que me enseñaron no solo lo que se cómo profesional sino me formaron como ser humano, A mis padres quienes han estado ahí para apoyarme en este proceso de formación, siendo mi pilar y soporte, principalmente a mi papa que hace miles de sacrificios todos los dias para que yo pueda alcanzar mis sueños, nada de esto habría sido posible sin su apoyo incondicional. También quiero extender mi gratitud a mis amigos, cuya valiosa ayuda, colaboración durante mi proceso de formación han sido fundamentales durante los obstáculos en este camino. Gracias por estar allí en los momentos difíciles y por compartir conmigo cada éxito, derrotas y logros.

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN A LOS SIG Y SU IMPORTANCIA EN LA HIDROLOGÍA	12
1.1 Definición de los SIG.....	12
1.1.1 Características principales de los SIG	12
1.1.2 Uso de los SIG para gestionar y analizar datos espaciales	13
1.2 Historia y evolución de los SIG	14
1.2.1 Primeros antecedentes: antes de los SIG	15
1.2.2 Nacimiento de los SIG: 1960s - 1970s	15
1.2.3 Expansión y desarrollo: 1980s.....	16
1.2.4 Crecimiento y popularización: 1990s	16
1.2.5 Era moderna de los SIG: 2000s - presente	17
CAPÍTULO 2: CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDROLOGÍA PARA EL ANÁLISIS CON SIG	18
2.1 El ciclo hidrológico.....	18
2.1.1 La precipitación	19
2.1.2 Infiltración	19
2.1.3 Escorrentía	19
2.1.4 Evaporación	20
2.1.5 Transpiración	20
2.1.6 Condensación.....	20

2.2	Cuencas hidrográficas	21
2.2.1	Subcuencas hidrográficas	22
2.3	Parámetros hidrológicos.....	23
2.3.1	Caudal	23
2.3.2	Precipitación	23
2.3.3	Infiltración	24
2.3.4	Evapotranspiración	24
2.3.5	Esorrentía	24
2.3.6	Pendiente del terreno	25
CAPÍTULO 3: HERRAMIENTAS SIG UTILIZADAS EN EL ANÁLISIS HIDROLÓGICO..		26
3.1	Software y plataformas SIG.....	26
3.1.1	ArcGIS.....	26
3.1.2	QGIS	26
3.1.3	GRASS GIS	26
3.1.4	HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System)	27
3.2	Fuentes de datos.....	27
3.2.1	Mapas topográficos.....	27
3.2.2	Modelos Digitales de Elevación (DEM)	27
3.2.3	Imágenes satelitales	28
3.2.4	Datos de las estaciones meteorológicas.....	28
3.2.5	Datos hidrológicos.....	29
3.3	Principales funciones de los SIG para hidrología.....	29
3.2.6	Delimitación de cuencas hidrográficas	29

3.2.7	Análisis de redes de drenaje	30
3.2.8	Cálculo de escorrentía	30
3.2.9	Análisis espacial de caudales.....	30
CAPÍTULO 4: REVISIÓN DE LITERATURA SOBRE EL USO DE SIG EN HIDROLOGÍA		31
DISCUSIÓN		68
CONCLUSIONES.....		72
REFERENCIAS		74

Lista de Figuras

Figura 1. Representación del Ciclo Hidrológico	18
Figura 2. Esquema del ciclo Hidrológico.	20
Figura 3. Diagrama de cuenca Hidrográfica.....	21
Figura 4. Características de los Modelos de Elevación.....	28
Figura 5. Curvas de permanencia de niveles en los periodos 1934-1946 y1993-2005.	41
Figura 6. Uso de imágenes satelitales y SIG en la generación de mapas de CN.....	43
Figura 7. Caudal máximo acumulado sobre la red principal de drenaje (runoff para Q, método CN, para $D = T_c$).	45
Figura 8. Modelo cartográfico para estimar la escorrentía directa.	47
Figura 9. Sistema de Modelamiento de Precipitación-Escorrentía.	50
Figura 10. Hietogramas - sintéticos para diferentes periodos de retorno.	55
Figura 11. Rodríguez Vagaría, A. y Gaspari, F. (2010): “GeoQ: Herramienta para la determinación del número de curva y escorrentía bajo entorno SIG. Idrisi Andes®”, GeoFocus (Informes y comentarios), nº 10, p.11-26. ISSN: 1578-5157.....	60
Figura 12. Flujograma del modelo geomórfico de erosión de Thornes usando datos globales de sensores remotos dentro de un SIG a escala regional.....	61
Figura 13. Delimitación de áreas inundables en las ramblas de Benipila (a) y de Los Lorentes (b) obtenidas con hEC-GeoRAS para diferentes tiempos de retorno.....	64
Figura 14. Integración del modelo DRASTIC en un SIG. Esquema conceptual.	66

Resumen

Esta monografía explora el uso de sistemas de información geográfica (SIG) en el análisis hidrológico, enfatizando su importancia para la gestión sostenible de los recursos hídricos y la reducción de riesgos naturales. Al revisar diferentes estudios realizados en diferentes países y regiones, es claro cómo mediante los SIG y aplicando diferentes herramientas de teledetección y modelos matemáticos, han hecho un cambio notorio en el análisis de variables como el flujo, el balance hídrico, la precipitación, determinación de caudales, mapas y el flujo máximo. Gracias a estas herramientas nos permiten integrar y realizar análisis de datos espaciales y temporales, realizar diferentes modelos hidrológicos detallados y crear mapas temáticos para identificar las áreas más vulnerables a diversos eventos como inundaciones, sequías y erosiones del suelo. La capacidad de los SIG para trabajar con innumerables datos en cuencas no instrumentadas y adaptarse a diferentes simulaciones para luego después de un exhaustivo análisis convertirlo en una solución indispensable a la hora de abordar los problemas que presentan el cambio climático, mejorando la planificación espacial y de igual manera mejorar la sostenibilidad ambiental.

Abstrac

This monograph explores the use of geographic information systems (GIS) in hydrology, emphasizing their importance for the sustainable management of water resources and the reduction of natural risks. When reviewing different studies carried out in different countries and regions, it is clear how, through GIS and applying different remote sensing tools and mathematical models, they have made a notable change in the analysis of variables such as flow, water balance, precipitation, determination of flow rates, maps and maximum flow. Thanks to these tools, they allow us to integrate and perform spatial and temporal data analysis, carry out different detailed hydrological models and create thematic maps to identify the areas most vulnerable to various events such as floods, droughts and soil erosion. The ability of GIS to work with countless data in non-instrumented basins and adapt to different simulations and then, after an exhaustive analysis, turn it into an indispensable solution when addressing the problems presented by climate change, improving spatial and planning. Likewise, improve environmental sustainability.

Introducción

En los últimos años, hemos visto que el análisis hidrológico se ha convertido en una pieza fundamental a la hora de hablar de la gestión de los recursos hídricos, tanto la planificación espacial y la prevención de desastres hídricos. anteriormente el análisis hidrológico se basaba en métodos manuales y aproximaciones matemáticas por lo tanto no eran tan efectivos a la hora de mostrar los datos, pero en ese momento era la herramienta con la que se contaba. Sin embargo, los métodos aplicados tenían muchas limitaciones por ejemplo la falta de precisión y varias dificultades a la hora de modelar diferentes escenarios ya que eran áreas geográficas bastante extensas. Entonces ahí es donde aparecen los sistemas de información geográfica (SIG) estos marcaron un punto de inflexión a la hora de analizar datos, haciendo que revolucionara la forma en que se gestionan y se analizan los datos hidrológicos.

Los SIG permiten actualmente la integración, la gestión y el análisis de manera rápida y precisa de grandes cantidades de datos espaciales creando modelos hidrológicos más detallados tanto así que son muy minuciosos y confiables. Al procesar esta información georreferenciada, como por ejemplo datos del terreno, datos meteorológicos y datos de uso de la tierra, los SIG abren muchas posibilidades para estudiar fenómenos esenciales como el flujo, la delimitación de cuencas hidrográficas y la predicción de inundaciones. Claramente tiene un impacto directo en las decisiones tomadas o relacionadas con la gestión del agua y nuestros recursos naturales, ayudándonos a mejorar la precisión, la eficiencia y la capacidad de prevenir riesgos de manera más efectiva y precisa.

Esta monografía explora las herramientas usadas con apoyo a las SIG y diferentes metodologías aplicadas al análisis hidrológico, comparando sus aplicaciones y los tipos de información que estos pueden manejar. A través de diferentes estudios hechos en el mundo de

desea demostrar como la tecnología de las SIG están revolucionando la obtención de datos y las diferentes investigaciones realizadas destacando los beneficios que las SIG nos ofrecen en la actualidad.

Capítulo 1: Introducción a los SIG y su importancia en la hidrología

1.1 Definición de los SIG

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas tecnológicas que nos ayudan a procesar datos espaciales o geográficos. Su finalidad es recopilar, almacenar, analizar, gestionar y por último mostrar la información relacionada con una ubicación específica. A partir de estas herramientas se pueden integrar diferentes tipos de datos relacionados con la ubicación, siendo de gran ayuda al momento de comprender y de analizar los fenómenos que pueden ocurrir en el espacio de una manera más clara y sencilla.(Lo & Yeung, 2002)

1.1.1 Características principales de los SIG

- **Integración de datos espaciales y no espaciales:** los SIG no sólo manejan información geográfica como puede ser las ubicaciones o las coordenadas, sino que también tienen la capacidad de asociar varios detalles relevantes como las características físicas, sociales o la económicas a estas ubicaciones. Se pueden asociar las coordenadas geográficas con las precipitaciones en un área y analizar al mismo tiempo el uso del suelo en la misma área. Esta capacidad combina diferentes tipos de datos y la convierte en una herramienta poderosa para comprender mejor su entorno y poder tomar decisiones informadas (Lloret & Olivella, 2017).
- **Capacidad de análisis espacial:** Una de las cualidades más importantes que tienen los SIG es su capacidad para analizar las distintas relaciones espaciales de diferentes capas de datos. Esto puede incluir actividades como superponer mapas, realizar un análisis de proximidad, explorar las redes de transporte o poder identificar patrones espaciales. Por medio de estas capacidades, los SIG nos permiten obtener una comprensión más profunda de cómo funcionan o interactúan los diferentes factores en un espacio determinado,

haciendo que sea más fácil la toma de decisiones y la planificación estratégica (Lloret & Olivella, 2017).

- **Visualización de datos:** Los SIG llaman la atención por su capacidad de transformar hasta los datos más complejos en representaciones claras y bastante comprensibles como mapas, gráficos y tablas. la forma de estas representaciones no sólo organiza la información de una forma accesible y detallada, sino que también nos ayuda en la interpretación de los fenómenos espaciales, logrando que mediante la identificación de patrones y las tendencias que se podrían haber ignorado o haberlas pasado por alto.
- **Gestión de bases de datos:** una de las características que tienen los SIG es la capacidad de almacenar una gran cantidad de información en bases de los datos bien estructurados. Estos datos pueden estar georreferenciados, o sea están vinculados a una ubicación específica en el espacio geográfico. Esta característica le permite tanto organizar y administrar la información de manera bastante eficiente, logrando que sea más fácil su análisis y la aplicación en diferentes entornos (Rigaux et al., 2002).
- **Actualización en tiempo real:** en gran medida los SIG nos brindan la capacidad de interactuar con diferentes datos en tiempo real, incluida la actualización o edición de información directamente en el mapa. Esta capacidad es particularmente valiosa en la gestión de recursos naturales, donde el cambio es constante y los datos actualizados son fundamentales para tomar decisiones informadas.

1.1.2 Uso de los SIG para gestionar y analizar datos espaciales

- Los SIG son una herramienta de análisis y gestión de datos espaciales ampliamente utilizada en diversos campos como la planificación urbana, la gestión de recursos naturales, el análisis ambiental y especialmente la hidrología. Desde una perspectiva

hidrológica, los SIG permiten importantes análisis, como balances hídricos, estudios de flujo, evaluaciones de cuencas hidrológicas, modelización hidrológica, identificación de la zona de riesgo, el análisis de las redes de drenaje y la comparación de diferentes escenarios climáticos o de igual manera el uso del agua. Estas características hacen de los SIG una herramienta indispensable para la comprensión y la gestión de los recursos hídricos de una forma más eficiente y de igual manera precisa (Sáenz Saavedra, 1992).

- **Delimitar cuencas hidrográficas:** Los SIG facilitan la identificación de las áreas de captación de agua y la división natural de los terrenos, lo que permite una mejor comprensión de las cuencas hidrográficas.
- **Análisis de redes de drenaje** Utilizando SIG, se pueden identificar y analizar redes de ríos, arroyos y otros cuerpos de agua y evaluar sus flujos y comportamiento para optimizar la gestión del agua en estas áreas.
- **Modelado hidrológico:** Utilizando datos espaciales como el terreno, las precipitaciones y el uso de la tierra, los SIG pueden modelar fenómenos como la escorrentía y la infiltración de agua, lo que ayuda a tomar decisiones informadas sobre la gestión de los recursos hídricos.
- **Identificación de zonas de riesgo:** Los SIG son una herramienta clave para mapear y analizar áreas vulnerables a eventos como inundaciones, sequías u otros riesgos relacionados con el agua, proporcionando datos críticos para la planificación y prevención de desastres.

1.2 Historia y evolución de los SIG

Desde su introducción en las décadas de 1960 y 1970, los sistemas de información geográfica (SIG) han experimentado un crecimiento Significativo, convirtiéndose en una

importante herramienta de análisis espacial en diversos campos como la planificación urbana, la gestión de recursos naturales y, especialmente, la hidrología. Los SIG han pasado por diversas etapas en su desarrollo, reflejando los avances en la tecnología de software y hardware y el continuo aumento de los datos geográficos, lo que ha permitido ampliarlos y mejorarlos continuamente (ESRI, 2022).

1.2.1 Primeros antecedentes: antes de los SIG

Antes del desarrollo de los SIG modernos, el análisis geográfico y cartográfico se realizaba manualmente. Durante Siglos, los mapas han sido la herramienta principal para representar el espacio geográfico. La creación y superposición de mapas temáticos, como mapas de uso del suelo o mapas de elevación, se realiza manualmente, lo que limita la capacidad de analizar grandes cantidades de datos espaciales (ESRI, 2022).

A principios del Siglo XIX, John creó mapas de nieve para estudiar las epidemias de cólera. La conferencia de Londres marcó un punto de inflexión en el análisis espacial. El mapa vincula la ubicación de los casos de cólera con fuentes de agua contaminadas, uno de los primeros usos de datos espaciales para abordar un problema de salud pública. Este trabajo se considera un precursor del análisis espacial moderno y uno de los fundamentos del uso de SIG para resolver problemas complejos (ESRI, 2022).

1.2.2 Nacimiento de los SIG: 1960s - 1970s

El desarrollo formal de los SIG comenzó en la década de 1960, impulsado por la necesidad de gestionar grandes cantidades de datos geográficos y realizar análisis complejos de manera más eficiente. Uno de los primeros sistemas SIG fue el Sistema Canadiense de Información Geográfica (CGIS), creado en 1963 por el geógrafo Roger Tomlinson para gestionar el Registro de la Propiedad de Canadá (ESRI, 2022).

Este sistema se utilizó para analizar datos geográficos y facilitar la planificación del uso del suelo, sentando las bases para los SIG modernos tal como los conocemos hoy. Roger Tomlinson es reconocido como el "Padre de GIS" debido a sus contribuciones. Durante esta década, los avances en informática permitieron a los SIG procesar digitalmente datos espaciales, cambiando fundamentalmente las posibilidades del análisis geográfico y abriendo nuevas oportunidades en el campo (ESRI, 2022).

1.2.3 Expansión y desarrollo: 1980s

En la década de 1980, el crecimiento de las computadoras personales y el desarrollo de software especializado hicieron que los SIG fueran más accesibles para instituciones y empresas. Durante este período surgió el primer software SIG comercial, como ArcInfo desarrollado por el Environmental Systems Research Institute (ESRI), que rápidamente se convirtió en uno de los líderes mundiales en SIG (ESRI, 2022).

Durante este período, comenzaron a desarrollar modelos ráster (basados en líneas) y vectoriales (basados en puntos, líneas y polígonos) que continúan desempeñando un papel fundamental en la gestión de datos espaciales. Estos modelos mejoran la precisión del análisis de mapas y facilitan la integración de diferentes capas de información, ampliando las capacidades de los SIG (ESRI, 2022).

1.2.4 Crecimiento y popularización: 1990s

En la década de 1990, la tecnología SIG comenzó a expandirse significativamente debido a la llegada de las computadoras personales y el mejor acceso a los datos geográficos. A lo largo de los años, los avances en la tecnología de teledetección y las mejoras en la recopilación de datos satelitales han permitido una integración más eficiente de las imágenes satelitales con los datos espaciales, enriqueciendo las capacidades de los SIG (ESRI, 2022).

Además, se crearon interfaces nuevas, más simples y más convenientes para facilitar la visualización de datos en tiempo real, lo que ayudó a expandir el uso de SIG en múltiples disciplinas. Esta década ha visto el surgimiento de plataformas especializadas que sirven no sólo a los geógrafos sino también a expertos en campos como la hidrología, la ecología, la salud pública y la planificación urbana (ESRI, 2022).

1.2.5 Era moderna de los SIG: 2000s - presente

En las últimas dos décadas, los avances en el acceso a la información geográfica y el aumento de la potencia informática han transformado los SIG en una herramienta analítica más poderosa. La proliferación de dispositivos GPS, la adquisición de imágenes satelitales de alta resolución y el desarrollo de mapas en línea como Google Earth y OpenStreetMap han puesto los datos espaciales a disposición de una audiencia global (ESRI, 2022).

Los SIG modernos pueden gestionar grandes cantidades de datos en tiempo real. tiempo, lo que facilita un análisis detallado a escala global. Además, la integración de los SIG con big data, inteligencia artificial y modelos predictivos ha ampliado Significativamente sus aplicaciones en áreas como la gestión del riesgo de inundaciones, el análisis climático y la planificación de los recursos hídricos, convirtiendo a los SIG en una herramienta clave para el análisis hidrológico (ESRI, 2022).

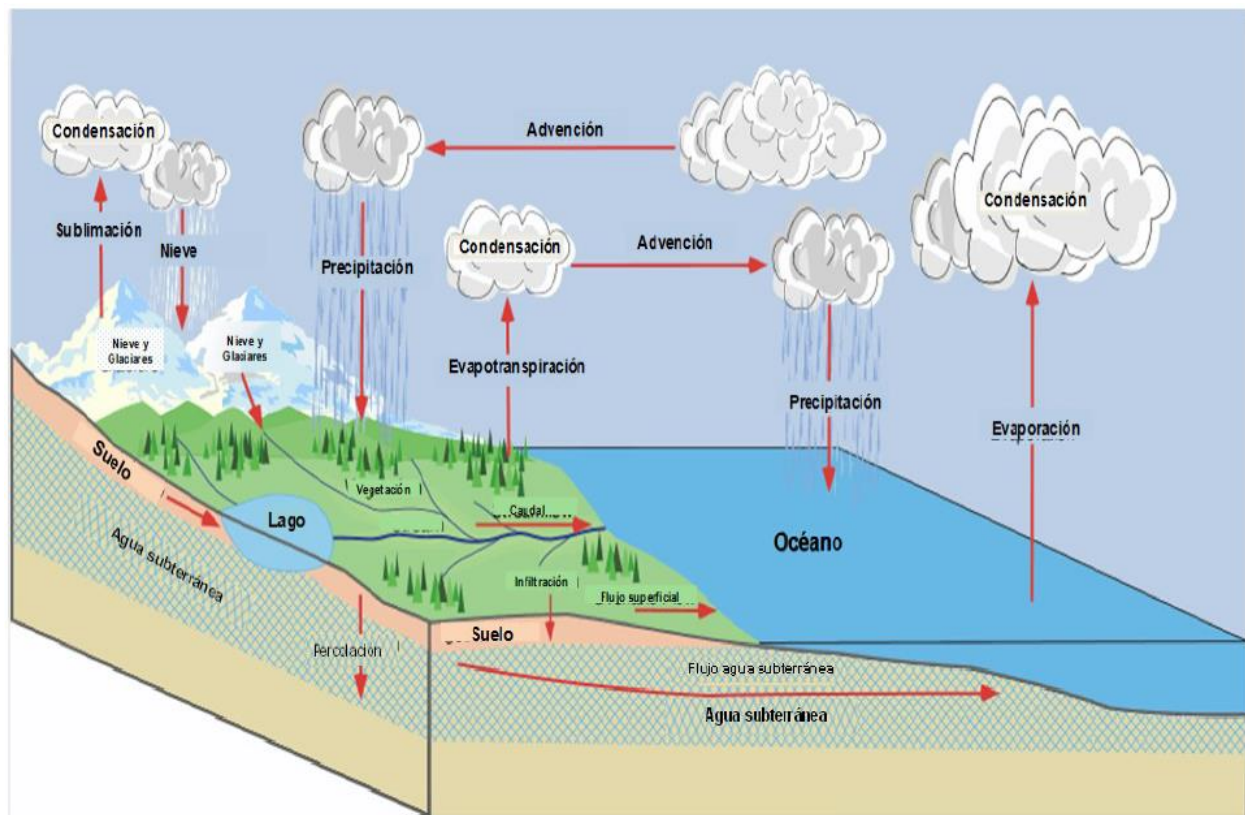
Capítulo 2: Conceptos básicos de hidrología para el análisis con SIG

2.1 El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es el proceso que se genera por medio de la circulación del agua en la naturaleza, este es impulsado principalmente por la energía solar. Este ciclo es fundamental para poder observar la distribución y la renovación del agua en los ecosistemas, siendo así un papel fundamental en el análisis hidrológico (Ordoñez Gálvez, 2011b).

Figura 1.

Representación del Ciclo Hidrológico



Fuente: (Ordoñez Gálvez, 2011b).

Ahora para que este ciclo este completo necesitamos hablar de varias etapas estas son:

2.1.1 La precipitación

La precipitación es el proceso en donde el agua cae desde la atmósfera a nuestra superficie terrestre ya sea en forma de lluvia, en forma de nieve, también en forma de granizo o en forma de niebla. La precipitación es la principal fuente de agua para los sistemas hídricos que tenemos, gracias a estos se abastecen los ríos, los lagos y los acuíferos. La cantidad de precipitación, la distribución y la frecuencia influyen directamente en la cantidad de agua disponible que podemos encontrar en una cuenca. (Ordoñez Gálvez, 2011b).

2.1.2 Infiltración

La infiltración es el proceso por el cual la precipitación penetra en el suelo. Una vez que el agua llega al suelo, una parte se infiltra y recarga los acuíferos subterráneos, mientras que otra se queda en las capas superiores del suelo para ser utilizada por las plantas o para evaporarse. La infiltración depende de factores como la porosidad del suelo, la vegetación y la pendiente del terreno (Carrillo Peña, 2018).

2.1.3 Escorrentía

La escorrentía es el flujo de agua sobre la superficie terrestre que ocurre cuando el suelo no puede absorber más agua o está impermeabilizado. Este fenómeno se produce después de lluvias intensas o prolongadas y es responsable de llenar ríos, arroyos y otros cuerpos de agua superficiales. La escorrentía puede ser superficial (cuando ocurre sobre la superficie del suelo) o subterránea (cuando ocurre a través de capas permeables del suelo, alimentando acuíferos y manantiales) (Carrillo Peña, 2018).

2.1.4 Evaporación

La evaporación es el proceso por el cual el agua se convierte en vapor y regresa a la atmósfera desde los cuerpos de agua, la tierra húmeda o las superficies vegetales. La evaporación es controlada por factores como la temperatura, la humedad, la velocidad del viento y la disponibilidad de agua (Ordoñez Gálvez, 2011b).

2.1.5 Transpiración

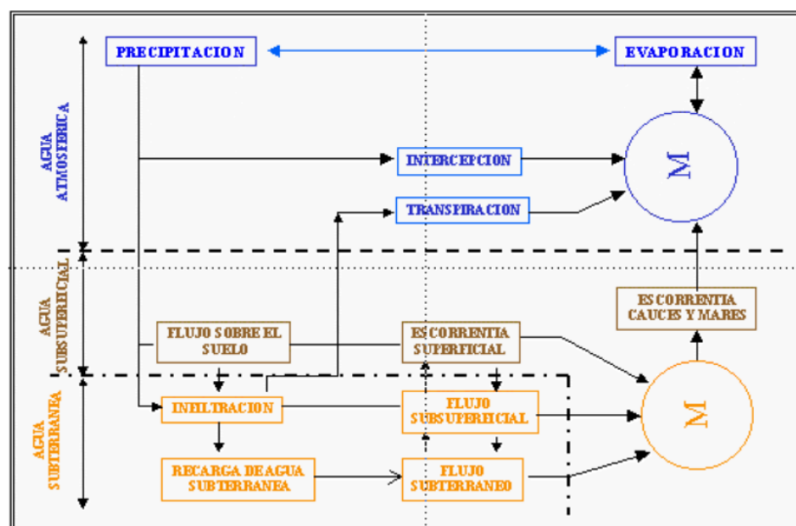
La transpiración es el proceso por el cual las plantas liberan vapor de agua a través de los poros de sus hojas. Al igual que la evaporación, este proceso devuelve agua a la atmósfera y forma parte de la evapotranspiración, que combina ambos procesos (Carrillo Peña, 2018).

2.1.6 Condensación

La condensación es el proceso por el cual el vapor de agua en la atmósfera se enfría y se convierte nuevamente en líquido, formando nubes. Eventualmente, el agua condensada cae nuevamente a la Tierra como precipitación, completando el ciclo hidrológico (Carrillo Peña, 2018).

Figura 2.

Esquema del ciclo Hidrológico.



Fuente:(Ordoñez Gálvez, 2011b).

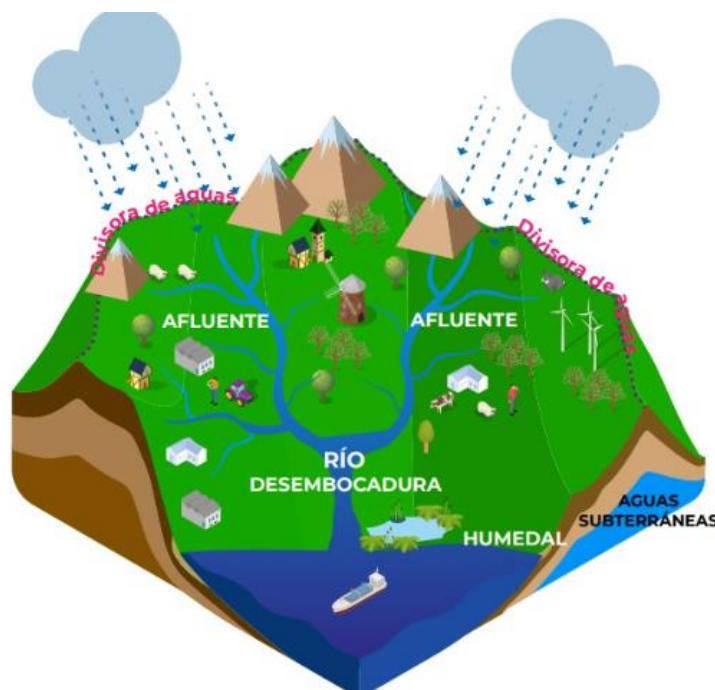
Cada uno de los incisos mencionadas anteriormente interactúa entre sí para completar el ciclo hidrológico, lo que garantiza la disponibilidad de agua en las cuencas hidrográficas. Esta interdependencia afecta directamente la modelación hidrológica y los análisis realizados con los SIG, ya que cada etapa del ciclo influye en el comportamiento del agua y, por lo tanto, en los resultados obtenidos mediante estas herramientas.

2.2 Cuencas hidrográficas

Una cuenca hidrográfica es el área de terreno donde toda el agua de precipitación, ya sea superficial o subterránea, fluye hacia un único punto, como un río, lago, o embalse. Es un concepto clave en el análisis hidrológico, ya que las cuencas actúan como unidades funcionales de captación y drenaje de agua (Ordoñez Gálvez, 2011c).

Figura 3.

Diagrama de cuenca Hidrográfica.



Fuente: (Escenarios Hídricos 2030, 2021)

Las cuencas hidrográficas son importantes en hidrología porque nos permiten estudiar cómo se mueve y distribuye el agua en el paisaje. Estas cuencas pueden variar en tamaño desde pequeñas subcuencas localizadas hasta grandes cuencas que abarcan múltiples áreas geográficas.

En primer lugar, se realiza una delimitación de cuencas y subcuencas, estas se realizan mediante las SIG y mediante este proceso se pueden determinar los límites naturales que posee una cuenca haciendo una evaluación de la topografía y la dirección que toma el flujo. Ahora también se realiza una modelación del flujo de agua, con ayuda de los SIG nos permite modelar el flujo del agua y ver cómo es su movimiento dentro de cualquier cuenca logrando identificar las rutas de flujo y las zonas donde se acumula el agua. Por último, con estos resultados se realiza una planificación de estos recursos hídricos mediante el estudio de las cuencas y las subcuencas permitiendo así una gestión más eficiente de los recursos hídricos que poseemos y realizar mejores gestiones cuando hablamos de almacenamiento de embalses y planificaciones de las infraestructuras de obras hídricas (Ordoñez Gálvez, 2011c).

2.2.1 Subcuencas hidrográficas

Una vez hecho el análisis en las cuencas podemos ver que hay fragmentaciones y estas son las subcuencas estas son divisiones más pequeñas, cuando hay cuencas muy grandes lo mejor es realizar un análisis más detallado mediante estas pequeñas subcuencas que al igual drenan agua a puntos o zonas en específico, principalmente los afluentes del río principal. Las subcuencas son importantes porque permiten un análisis más detallado y de igual manera más preciso cuando hablamos del flujo de agua y la distribución de nuestros recursos hídricos (Ordoñez Gálvez, 2011c).

2.3 Parámetros hidrológicos

Para el análisis hidrológico se mide y se evalúan varios parámetros esenciales para comprender como es el comportamiento del agua en una cuenca (Ordoñez Gálvez, 2011a). Los parámetros necesarios para este análisis y poder utilizar los SIG en la modelización hidrológica son los Siguietes:

2.3.1 Caudal

El caudal está definido con la cantidad de agua que puede fluir a través de un punto específico ya sea por un río o arroyo durante un período de tiempo determinado, el caudal es expresado usualmente en metros cúbicos por segundo (m^3/s). Este resultado puede variar debido a varios factores como pueden ser las precipitaciones, el uso que tiene el suelo y la topografía de la zona. Siendo este un parámetro esencial para comprender como es el comportamiento del flujo en los ríos y las cuencas. Gracias a los SIG podemos calcular las escorrentías en las areas determinadas utilizando los modelos del flujo y los mapas topográficos, realizando una gran mejora al momento de analizar con precisión los datos hidrológicos (Ordoñez Gálvez, 2011a).

2.3.2 Precipitación

Ahora la precipitación se puede definir como la cantidad de agua que cae sobre una superficie en forma de lluvia, en forma de nieve, talvez granizo o finalmente niebla. Este parámetro es bastante importante ya que nos ayuda a comprender la disponibilidad de agua con las que cuenta la cuenca hidrológica. Los SIG nos permiten insertar y también visualizar los datos de las estaciones meteorológicas y finalmente crear mapas que muestren como se hace la distribución espacial de la precipitación en dicha zona requerida (Ordoñez Gálvez, 2011a).

2.3.3 Infiltración

La infiltración se puede definir como la velocidad con la que el agua penetra el suelo desde la superficie. Algunos Factores pueden llegar a ser un obstáculo como la textura del suelo, la pendiente y la vegetación estas afectan la capacidad que tiene la superficie de permitir la infiltración. Este parámetro puede llegar a ser crítico ya que gracias a él simulamos los volúmenes de agua de escorrentía presentes en la zona, ya sea superficial o tal vez subterránea. Mediante los SIG nos ayudan a estimar la infiltración teniendo en cuenta las características del sitio o zona y el tipo de suelo que encontramos en el lugar (Ordoñez Gálvez, 2011a).

2.3.4 Evapotranspiración

La evapotranspiración se puede definir como un proceso que combina la evaporación del agua y a su vez la transpiración de las plantas. Este parámetro fundamental para el equilibrio hídrico ya que mediante este se determina la cantidad de agua que pueden perder los embalses y las superficies en el medio ambiente. Los SIG pueden ser de gran ayuda al analizar con mayor precisión y exactitud el ciclo del agua por medio del uso de los modelos climáticos para la estimación de la evapotranspiración en un área específica o zona requerida (Ordoñez Gálvez, 2011a).

2.3.5 Escorrentía

La escorrentía se define como el flujo de agua que se produce cuando hay un exceso de precipitación debido a que capacidad de infiltración del suelo no es suficiente. Este parámetro es crucial para los estudios tanto de inundaciones y de igual manera la modelización del flujo de las cuencas. Los SIG usan los datos de la lluvia y los datos de terreno para por medio de estos calcular la escorrentía, lo que nos facilita para la identificación de áreas propensas a inundaciones y así tomar las decisiones pertinentes (Ordoñez Gálvez, 2011a).

2.3.6 *Pendiente del terreno*

La pendiente se refiere a la inclinación que posee el terreno y este parámetro es bastante útil para determinar la rapidez de la gota de agua y ver su movimiento a través de la superficie. Cuanta más inclinación o más pronunciada llega a ser la pendiente, más rápido fluye la gota de agua en la superficie. Por medio de las SIG se utilizan los modelos de elevación digitales para realizar los cálculos de las pendientes en diferentes puntos o zonas de la cuenca, una vez teniendo los modelos nos ayuda a realizar una predicción de los patrones de escorrentía y el potencial de erosión sobre las áreas a trabajar (Ordoñez Gálvez, 2011a).

Capítulo 3: Herramientas SIG utilizadas en el análisis hidrológico

3.1 Software y plataformas SIG

Varias plataformas SIG se utilizan ampliamente en el análisis hidrológico debido a su capacidad para gestionar y analizar datos espaciales. Algunos de los más relevantes se describen a continuación:

3.1.1 ArcGIS

Desarrollado por Esri, **ArcGIS** es uno de los programas de análisis espacial más utilizados debido a su interfaz de usuario y su amplia gama de herramientas. Para el análisis hidrológico, ArcGIS puede crear modelos de elevación digitales (DEM), análisis de cuencas, redes de drenaje y modelado de escorrentía. Sus capacidades se mejoran con herramientas complementarias como Spatial Analyst e Hydrology Toolbox, que permiten un análisis avanzado de cuencas y vías fluviales (ESRI, 2002).

3.1.2 QGIS

QGIS es una plataforma de código abierto que es popular debido a su flexibilidad y actualizaciones constantes de la comunidad. Al igual que ArcGIS, proporciona potentes herramientas de análisis hidrológico, incluidos complementos como SAGA GIS y GRASS GIS, que permiten el modelado de cuencas hidrográficas y el análisis de flujo. QGIS es apreciado por su capacidad para integrar múltiples formatos de datos y su facilidad de personalización mediante scripts de Python (Gutiérrez Alarcón, 2022)

3.1.3 GRASS GIS

GRASS GIS es un software de código abierto que se especializa en análisis geoespacial avanzado y modelado hidrológico. Es conocido por su capacidad para procesar grandes cantidades de datos y realizar modelos complejos, como modelar el comportamiento de cuencas hidrográficas

bajo diferentes escenarios climáticos. Algunas de las herramientas de hidrología más útiles incluyen módulos para la delimitación de cuencas hidrográficas, cálculos de escorrentía y modelización del flujo de agua en redes de drenaje.(Neteler, 2005)

3.1.4 HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System)

HEC-HMS es un software desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. que se integra con SIG para modelar el ciclo hidrológico de una cuenca. El software se puede utilizar para simular procesos de lluvia, escorrentía superficial e infiltración. Aunque no es un SIG per se, se puede utilizar junto con ArcGIS o QGIS para realizar análisis complejos (Departamento de ingeniería hidráulica, Marítima y Ambiental, 2012)

3.2 Fuentes de datos

El análisis hidrológico requiere el uso de datos espaciales precisos y actualizados. Las principales fuentes de datos comúnmente utilizadas se describen a continuación:

3.2.1 Mapas topográficos

Los mapas topográficos proporcionan información importante sobre la elevación y la topografía de la superficie de la Tierra, lo cual es importante para delimitar cuencas hidrográficas y analizar el comportamiento del agua (Ruiz, 2009).

3.2.2 Modelos Digitales de Elevación (DEM)

Un modelo de elevación digital (DEM) es una representación tridimensional de la superficie de la Tierra. Son necesarios para el análisis de pendientes, creación de redes de drenaje y demarcación de cuencas. Con este modelado se pueden crear mapas de altura más precisos y detallados, lo que ayuda a analizar mejor la información (Felicísimo, 2004).

Figura 4.

Características de los Modelos de Elevación.



Fuente: (Cantero, 2023).

3.2.3 Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales nos permiten realizar un análisis del uso del suelo, de la vegetación y también los cambios del terreno. Para realizar este análisis se utilizan las imágenes de los satélites proporcionadas, y con estas imágenes hacen que sea más fácil el análisis de las afectaciones del uso de la tierra sobre el flujo del agua y de igual manera el comportamiento hidrológico (Cambalache Cooperativa Geográfica, s/f)

3.2.4 Datos de las estaciones meteorológicas

- Para poder modelar el ciclo hidrológico de una cuenca se necesitan los datos de la precipitación y datos de la temperatura, normalmente estos datos son obtenidos de las estaciones

meteorológicas locales. Con estos datos disponibles las bases de datos, se pueden realizar las diferentes simulaciones para lograr las aproximaciones de los comportamientos de los sistemas hidrológicos, los datos que nos ofrecen estas estaciones son : Temperatura en aire, humedad, presión barométrica, velocidad del viento, dirección del viento, precipitaciones, nivel de UV, grosor de nieve, temperatura en suelo, humedad del suelo, radiación solar, visibilidad, análisis de contaminación, medición de horas luz, medición de la altura de las nubes (Estación de meteorología, 2019).

3.2.5 Datos hidrológicos

Los análisis de flujo utilizan los datos históricos del flujo de ríos y afluentes proporcionados por las autoridades locales del agua. Por medio de estos datos, nosotros podemos estudiar el comportamiento que posee el flujo en los últimos años y poder predecir las condiciones que se puedan presentar en futuras ocasiones.

3.3 Principales funciones de los SIG para hidrología

Los SIG nos proporcionan una gran amplia gama de capacidades necesarias para realizar el análisis hidrológico. Las características más importantes son usadas a la hora de crear los mapas de elevación y la pendiente. Una de las capacidades más usadas de SIG es la creación de mapas de elevación y de pendiente a partir de varios modelos de elevación digitales (DEM). Estos mapas son necesarios para la determinación de las áreas de elevación más alta y las más bajas dentro de la cuenca, sabiendo que afectan la dirección y la velocidad que tiene el flujo de agua.

3.2.6 Delimitación de cuencas hidrográficas

Los SIG con su información permite el mapeo de las cuencas hidrográficas ayudando a identificarlas automáticamente según el tipo de terreno. Al utilizar la integración de herramientas como Hidrología en ArcGIS, podemos crear las cuencas y las subcuencas a partir de diferentes

modelos de elevación digitales (DEM), lo que nos facilita la comprensión de los diferentes comportamientos hidrológicos de una zona específica (Vásconez et al., 2019).

3.2.7 *Análisis de redes de drenaje*

Para analizar las redes de drenaje es primordial para comprender y entender cómo fluye el agua a través de los diferentes sistemas hidrológicos. Con el uso de los SIG, es más sencillo construir las redes de tuberías de drenaje y a su vez determinar las rutas de flujo de agua y a su vez calcular las cuencas de drenaje de cada afluente dentro de la cuenca.

3.2.8 *Cálculo de escorrentía*

Los cálculos de escorrentía se determinan mediante la integración de datos de precipitación y de las características del terreno en los modelos hidrológicos. Mediante los SIG nos ayudan a modelar el flujo y la dirección del fluido del agua durante las altas lluvias, esto permite que se puedan identificar las áreas propensas a las inundaciones (Huerta et al., 2010).

3.2.9 *Análisis espacial de caudales*

Los SIG utilizan datos de estaciones meteorológicas y flujos históricos para realizar análisis espaciales para determinar la relación entre las precipitaciones y el flujo de los ríos. Además, ayudan a crear modelos predictivos para diferentes escenarios climáticos, lo cual es importante para la gestión de cuencas (ESRI, 2024).

Capítulo 4: Revisión de Literatura sobre el Uso de SIG en Hidrología

En la actualidad la aplicación de los sistemas de información geográfica (SIG) en el análisis hidrológico ha demostrado tener grandes avances Significativos y se ha convertido en una herramienta bastante importante para la gestión hidrológica de cuencas, la modelización de flujos y las diferentes evaluaciones de fenómenos hidrológicos bastantes complejos. En este capítulo se quiere proporcionar una revisión de diferentes documentos que se han publicado de los diferentes estudios y artículos sobre la aplicación de los SIG en hidrología y como mediante dichos análisis se obtuvieron datos relevantes para los mismos estudios, centrándose en los métodos, enfoques y las diferentes herramientas utilizadas. Mediante esta comparativa, se revisarán los avances más importantes y ver las áreas de estudio donde los SIG han demostrado ser muy efectivos, a pesar de los desafíos y limitaciones que posee su aplicación.

En muchas zonas de nuestro planeta es muy común experimentar eventos comunes como sequías o inundaciones graves. Tenemos el caso de Sinaloa, donde a partir de la modelización mediante modelos integrados se puede predecir el inicio, la duración, la gravedad y el final de las sequías en esta zona, proporcionando una herramienta valiosa para gestionar futuros eventos.

Este método incluía el uso de análisis de frecuencias de caudales mínimos anuales tanto a nivel local como regional, aplicándose en sitios con escasa o nula información hidrológica. Con la simulación, se lograron estimar eventos de sequía para diferentes periodos de retorno y se delimitan zonas de riesgo (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 1998)

utilizando los sistemas de información geográfica se realizaron simulaciones que permitieron pronosticar el comportamiento de las sequías, incluyendo su inicio, duración, severidad y finalización. A través de análisis regionales y simulaciones sintéticas, el uso de las SIG. Fueron muy relevantes a la hora de crear modelos predictivos en áreas con poca información

hidrológica, lo que resulto crucial para la gestión de recursos hídricos ayudando a identificar zonas de riesgo de sequía, se plantearon ecuaciones regionales para estimar la probabilidad de estos eventos, lo que permitió mejorar la planificación y mitigación de sus efectos.

La técnica usada permitió que por medio de datos hidrométricos y simulaciones sintéticas se predijera el comportamiento de las sequías en la Región Hidrológica Número 10, Sinaloa, ubicada en el noroeste de México. La metodología aplicada se basó en análisis de frecuencias de caudales mínimos anuales para estimar eventos de sequía en sitios donde hay escasa o nula información hidrológica. En este se usa un proceso para definir regiones con características hidrológicas similares, lo que permite que se realice un análisis regional más preciso y confiable. Tomando en cuenta este proceso, se generaron múltiples simulaciones sintéticas que permiten modelar y simular diferentes eventos de sequía en la zona, lo que facilitó la realización de proyecciones. Luego se aplicaron varias técnicas estadísticas que ayudaron a identificar los periodos de sequía con una mayor precisión.

Una vez determinados los valores, el siguiente paso a seguir fue el modelado de datos y la aplicación de métodos para identificar las sequías y determinar la probabilidad, la duración e intensidad de la ocurrencia de sequías en dicha zona. Utilizando los datos de la media mensual (DMM) y los datos de la media anual (DMA) del déficit, se calcularon variables como la escasez de agua durante la sequía, lo que permitió cuantificar la gravedad de la sequía que presentaba la zona a lo largo de los años. A partir de lo observado en este análisis, se pudieron desarrollar ecuaciones regionales para estimar sequías con diferentes periodos de retorno en la zona, lo que les facilitó las futuras predicciones de sequías en regiones usando menos datos hidrológicos. (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 1998).

La técnica que fue utilizada también les permitió calcular la probabilidad en que las sequías comiencen en fechas específicas, se determinó que los meses con mayor riesgo de sequía se encontraban entre mayo y agosto.

Además, se estimaron duraciones promedio de las sequías de hasta cuatro meses, con déficits de agua que varían Significativamente entre valores mínimos y máximos anuales.

El uso de **SIG**, combinado con técnicas de simulación hidrológica, permite identificar zonas vulnerables a la sequía, predecir eventos con mayor precisión y planificar estrategias eficientes para la gestión de los recursos hídricos. Esta metodología llega a ser muy importante en áreas con poca o nula información histórica, ya que facilita la creación de datos predictivos a partir de modelos regionales, lo que contribuye a la toma de decisiones en situaciones de incertidumbre. Además, los SIG permiten integrar datos climáticos, topográficos y de uso del suelo, ofreciendo una visión integral que mejora la evaluación del riesgo y optimiza la respuesta ante fenómenos extremos como las sequías, siendo así crucial para la planificación de infraestructuras, la gestión agrícola y la protección de los ecosistemas

Ahora ya vimos como los SIG nos permiten determinar los niveles de sequía en una zona pero con ellos no solo se puede hacer eso sino que también podemos llegar a analizar otros factores como la precipitación de ciertas zonas como lo veremos a continuación en un estudio que se hizo en la cuenca amazónica peruana, la zona de estudio presenta una extensión considerable y variabilidad climática, donde podemos ver grandes desafíos para la gestión de los recursos hídricos, principalmente debido a la escasez de datos hidrométricos y pluviométricos, se realizó un análisis de precipitaciones en zonas de las cuales había poca información mediante la exploración en el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y estimaciones de precipitación por satélite como herramientas fundamental en el modelado hidrológico distribuido,

En donde se esperaba evaluar la utilidad de las estimaciones satelitales de lluvia para mejorar los pronósticos hidrológicos y la gestión de los recursos hídricos en la **cuenca amazónica peruana**, una región donde la disponibilidad de datos hidrológicos era limitada (Barragán, 2013)

En ese proceso se dieron cuenta que los **SIG** permiten integrar y analizar datos espaciales distribuidos, esenciales para representar con precisión el comportamiento hidrológico de grandes cuencas como la Amazonía peruana. Los SIG facilitaron la captura, almacenamiento y procesamiento de información georreferenciada, como mapas de precipitación, topografía y redes de drenaje, lo que es crucial para el desarrollo de modelos hidrológicos distribuidos.

Para realizar este análisis se llevaron diferentes etapas en donde inicialmente se realiza una delimitación de la cuenca haciendo un modelo digital de elevación realizándose de manera más eficaz gracias a las SIG, identificando las redes de drenaje y realizando el cálculo de las áreas de captación, luego mediante el uso de imágenes satelitales y datos climáticos por medio del uso de las SIG se generaron mapas tomando como datos la precipitación y la evapotranspiración, los cuales son esenciales para el balance hídrico y por ultimo ya con la información obtenida se realiza la simulación hidrológica mediante el Modelo de Grandes Cuencas (MGB-IPH), que simula el comportamiento del flujo de agua en la cuenca, incorporando la variabilidad espacial y temporal de la precipitación y otras variables meteorológicas (Barragán, 2013).

El enfoque del modelado hidrológico distribuido, implementado en el **MGB-IPH**, es uno de los aspectos más importantes del uso de los SIG en el análisis hidrológico de grandes cuencas. Este modelo utiliza datos de precipitación satelital estimada (TMPA V7, CMORPH, PERSIANN) para simular caudales diarios y generar hidrogramas en la cuenca del Amazonas peruano (Barragán, 2013).

El modelo se basó en la división de la cuenca en unidades llamadas **Unidades de Respuesta Agrupada (GRU)**, donde se calcularon balances hídricos en función de la precipitación, el almacenamiento de agua en el suelo y la escorrentía generada. Mediante Los SIG ayudaron a fragmentar la cuenca en elementos espaciales mínimos, denominados píxeles y la clasificación de las áreas de respuesta hidrológica, integrando información espacial detallada sobre la cobertura del suelo, la topografía y los suelos. El uso de datos satelitales junto con herramientas SIG proporciono una solución eficiente para la modelación hidrológica en áreas con datos limitados. Aunque se lograron resultados positivos, la precisión del modelo puede mejorarse mediante la integración de más datos locales y una mayor calibración así que entre más datos se tengan más eficiente es el modelo.

Por otro lado, podemos ver en el estudio realizado por la revista ambiental donde usando los modelos hidrológicos para determinar las cuencas que se encuentran en el páramo teniendo como enfoque técnico en la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelos hidrológicos en la delimitación de cuencas y el análisis del comportamiento hidrológico en los páramos del municipio de Toca, Boyacá, Colombia. El estudio emplea el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) integrado con ArcGIS para procesar la información espacial de la región y delimitar cuencas y subcuencas (Reyes, 2013)

Los SIG juegan un papel fundamental en este análisis, ya que permiten la integración de datos geoespaciales y el modelado hidrológico a partir de información obtenida de modelos de elevación digital (MDE) y datos climáticos. Ahora para la Delimitación de cuencas y subcuencas, Los SIG, a través de ArcSWAT (extensión de SWAT para ArcGIS), permiten la delimitación precisa de las cuencas hidrográficas basándose en la topografía del terreno. Ahora el modelo de elevación digital (DEM) de resolución de 30 metros es utilizado en este análisis ya que ayuda a

identificar las redes de drenaje y los flujos de agua dentro de dicha cuenca. La identificación automática de subcuencas y los puntos de salida estuvieron basados en MDE y los ríos fueron mapeados. En este proceso es importante comprender el comportamiento hidrológico de cada subcuenca y para poder gestionar eficazmente los recursos hídricos.

Para realizar este análisis, se utilizaron los SIG para ayudar a calcular los parámetros morfológicos como el área designada de la cuenca, la pendiente, el perímetro y la longitud del canal. Siendo así parámetros fundamentales para determinar las características físicas de las cuencas y subcuencas para entender mejor su capacidad para retener y liberar agua. La extracción de estos parámetros y su presentación en mapas temáticos puede ayudar a proporcionar una comprensión detallada de la dinámica hidrológica del ecosistema de Páramo.

Para realizar el modelo de precipitación se tuvieron en cuenta los datos de estaciones meteorológicas locales y el método de polígonos de Thiessen, Esto permite un análisis más preciso de la distribución espacial de las lluvias y su impacto en la escorrentía y el caudal de los ríos, la integración realizada mediante SWAT, en combinación con ArcGIS9.3 y ArcSWAT, permitió realizar simulaciones hidrológicas continuas que tienen en cuenta variables climáticas, del suelo y del uso de la tierra. Estas simulaciones permiten evaluar los efectos de diferentes prácticas de manejo del suelo sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca. El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite una parametrización precisa de los modelos SWAT para optimizar el modelado de escorrentías y flujos en ecosistemas de páramo que son muy sensibles a los cambios en el uso de la tierra y la gestión del agua.

Ahora, teniendo en cuenta los SIG es necesario el uso combinado de GIS y SWAT haciendo que contribuya a un análisis hidrológico más eficaz para la cuenca de Cortadera, mediante este proceso se logró obtener información detallada sobre el comportamiento del agua

en la zona. La herramienta SWAT a través de la integración con ArcGIS, permitió la creación de archivos de entrada y la visualización de resultados en mapas, gráficos y tablas, dando los datos de una manera más ordenada y facilitando la interpretación de los datos hidrológicos.

Lo siguiente fue evaluar los impactos que generaban a partir del uso del suelo y analizar cómo era la gestión del agua en la región, se realizó mediante el modelo hidrológico SWAT que simuló la escorrentía y el flujo superficial en la cuenca y subcuenca. Las cinco subcuencas de Cortadera Páramo están divididas con precisión según la topografía y la red hídrica. Utilice SIG para calcular automáticamente parámetros morfológicos como el área de la cuenca, la pendiente y la longitud del canal para facilitar la integración en modelos hidrológicos.

El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) nos ayuda en combinación con el modelo hidrológico SWAT ofreciendo una herramienta esencial para el análisis hidrológico en ecosistemas de páramo. La capacidad de delimitar cuencas y modelar el comportamiento del agua en función de parámetros climáticos y morfométricos mejora significativamente la planificación y gestión de los recursos naturales en estas áreas vulnerables.

Anteriormente nos dimos cuenta que los SIG nos ayudan a determinar precipitaciones para cualquier zona que requerimos de igual manera también podemos determinar otros parámetros como caudales, en el estudio realizado en la zona de Tarija se determinó que era importante generar estudios hidrológicos detallados en las cuencas cercanas, como la cuenca del río San Pedro ya que no se contaba con la información suficiente para la zona. Este estudio se utilizaron los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y herramientas de modelación hidráulica para determinar los caudales máximos y los niveles de agua en distintos periodos de retorno, información esencial para prevenir riesgos de inundación y planificar obras de protección (Aldana Flores & Leigue Fernández, 2022).

En el estudio se analiza el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para realizar un estudio hidrológico en la cuenca del río San Pedro. Teniendo por meta determinar los caudales máximos y el tirante de agua en diferentes periodos de retorno, utilizando herramientas de SIG y el software HEC-RAS para la modelación hidráulica. El uso de SIG es notable en la delimitación de la cuenca y la generación de parámetros morfométricos que son esenciales para modelar el comportamiento hidrológico donde se puede desatacar varios resultados parciales utilizando el software ArcMap 10.3, se delimito la cuenca del río San Pedro estableciendo el punto de cierre en la intersección del río con el proyecto de la segunda circunvalación de la ciudad de Tarija. Esta delimitación permitió establecer los límites de la cuenca y obtener una red de drenaje precisa, fundamental para el análisis hidrológico. Con la ayuda de Modelos Digitales de Elevación (MDE), descargados de la plataforma GeoBolivia, se identificaron las características topográficas de la cuenca, que fueron clave para la modelación de escorrentías y el análisis de caudales (Aldana Flores & Leigue Fernández, 2022).

Con los datos que recopilaron A través de ArcMap, se obtuvieron parámetros esenciales como el área, perímetro, longitud de la cuenca, relación de bifurcación, pendiente de los ríos, y tiempo de concentración. Estos parámetros morfométricos se calcularon mediante geo procesos en el software y sirvieron de base para la estimación del caudal máximo y el tirante en la cuenca. Por otro lado, El tiempo de concentración, que es el tiempo que tarda el agua en llegar al punto de salida desde cualquier parte de la cuenca, fue calculado utilizando fórmulas basadas en los datos topográficos extraídos de los SIG (Aldana Flores & Leigue Fernández, 2022).

Para la generación de mapas se utilizaron estaciones pluviométricas locales y el método de Polígonos de Thiessen al igual que en el estudio anterior para calcular la precipitación media en la cuenca. Este método se implementó utilizando los SIG, permitiendo distribuir espacialmente

las precipitaciones sobre la cuenca, Para luego estimar la escorrentía, en donde se empleó el coeficiente de escorrentía ponderado, calculado en base a la cobertura vegetal, el tipo de suelo y la pendiente del terreno. Todos estos datos fueron integrados y procesados en ArcGIS para generar mapas precisos de escorrentía (Aldana Flores & Leigue Fernández, 2022).

Para la modelación se usaron los datos geoespaciales generados en ArcMap después fueron exportados al software HEC-RAS para modelar el comportamiento hidráulico del río San Pedro. Esta integración entre SIG y HEC-RAS permitió simular los tirantes máximos de agua en distintos periodos de retorno, ayudando a prever los niveles de inundación y los caudales máximos en eventos extremos de lluvia (Aldana Flores & Leigue Fernández, 2022).

Al terminar con el análisis realizado en la cuenca del río San Pedro permitió determinar que la cuenca tiene una forma rectangular oblonga, lo que le confiere una respuesta hidrológica lenta, con un drenaje regular durante eventos de precipitación. Las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) generadas en SIG proporcionaron información clave para entender cómo varía la precipitación en diferentes periodos de retorno. Obteniendo varios resultados Se estableció que el caudal máximo esperado en un periodo de retorno de 200 años es de 105,75 m³/s, con un tirante máximo de 2,35 metros, lo que es crucial para el diseño de infraestructuras viales y obras de protección en la región (Aldana Flores & Leigue Fernández, 2022).

Una vez más las gracias a el uso de SIG y herramientas de modelación como HEC-RAS permitió delimitar con precisión la cuenca del río San Pedro y calcular los caudales máximos en diferentes periodos de retorno. La capacidad de los sistemas de información geográfica (SIG) para integrar datos espaciales y climáticos juega un papel clave en la producción de mapas precisos de flujo de agua y precipitación, mejorando así la precisión de los modelos hidrológicos. Los resultados obtenidos son cruciales a la hora de realizar la planificación de infraestructuras y la

gestión del riesgo de inundaciones, debemos tener en cuenta que no solo se aplica para la ciudad de Tarija, sino para cualquier proyecto que necesite implementarlo en el futuro.

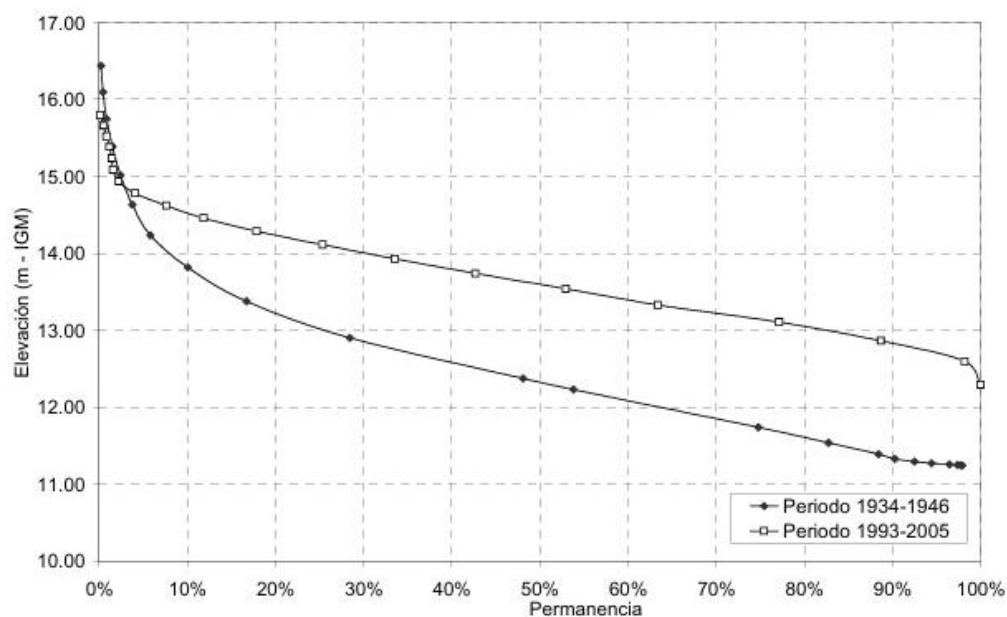
Como hemos observado, los sistemas de información geográfica (SIG) han sido de gran relevancia y han transformado el análisis hidrológico a la hora de proporcionar una plataforma bastante completa que integra datos espaciales y datos temporales permitiéndonos modelar fenómenos complejos como la escorrentía, la distribución de las precipitaciones y ver el comportamiento de las cuencas hidrográficas. Podemos notar que en cuencas semiáridas con precipitaciones impredecibles y una respuesta hidrológica rápida, los sistemas de información y los modelos digitales de elevación (DEM) demuestran ser herramientas esenciales para generar datos precisos y relevantes como redes de drenaje y diferentes parámetros geomorfológicos (Kaless et al., 2008).

Inicialmente se usaron los SIG para construir las redes de tuberías de drenaje y luego dibujar las cuencas hidrológicas para finalmente terminar con la red de tuberías de drenaje gracias al modelo de elevación este se puede extraer automáticamente. Siendo de gran ayuda al momento de mapear con precisión las cuencas y subcuencas, por otro lado, nos ayuda a determinar las rutas con mayor incidencia o las rutas preferidas por el movimiento del agua a través de la superficie, esto hace que sea mucho más fácil comprender cómo se distribuye y también como se acumula el agua dentro de las cuencas.

Ahora el DEM nos proporciona la información topográfica de manera más detallada y esta se utiliza para realizar los cálculos de la dirección del flujo y el área de captación para cada sección de la red. Estas redes creadas en SIG pueden crear mapas que reflejan la estructura de las cuencas y los efectos de los cambios topográficos en el flujo y el volumen (Kaless et al., 2008).

Figura 5.

Curvas de permanencia de niveles en los periodos 1934-1946 y 1993-2005.



Fuente: (Kaless et al., 2008).

El análisis muestra que la resolución del modelo de elevación digital (DEM), ya sea 50 m, 70 m 100 m, tiene poco impacto en el hidrograma simulado. Esto indica que pequeños cambios en el tamaño de las celdas no tienen un impacto Significativo en las predicciones hidrológicas. Sin embargo, la selección de la región umbral es crucial para garantizar la precisión del modelado, ya que afecta directamente la representación de la red de drenaje y su conectividad (Kaless et al., 2008).

Ya vimos que los SIG nos permiten realizar el análisis de diferentes parámetros geomorfológicos como son la densidad del drenaje y la dimensión de las diferentes redes hidrológicas. Estos parámetros pueden varían según la escala de EDM y son necesarios para la aplicación del modelo distribuido a las condiciones específicas para cada cuenca. Entonces tenemos que podemos ver que la combinación de tecnología en el modelado hidrológico es basada en SIG y DEM se está convirtiendo en una herramienta bastante esencial a la hora de analizar y

poder predecir los comportamientos hidrológicos de cuencas más complejas. Aunque podemos ver la resolución del EDM este tiene un impacto limitado en los resultados de la curva del proceso, en la selección correcta de la región umbral aun así sigue siendo importante para obtener simulaciones confiables. Aparte del uso de los SIG estos mejoran la representación espacial de los parámetros geomorfológicos, esto resulta bastante beneficioso para la planificación de los recursos hídricos. Este enfoque es particularmente útil a la hora de predecir el riesgo de inundaciones, diseñar una buena infraestructura hídrica y gestionar los eventos hidrológicos extremos (Kaless et al., 2008).

El análisis hidrológico ha tenido un gran avance por el uso de tecnologías como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ahora también integrando las imágenes satelitales. Como bien sabemos las SIG nos permiten integrar y gestionar grandes volúmenes de información espacial a una velocidad muy rápida y eficaz haciendo que los resultados sean más precisos la hora de modelar procesos como el escurrimiento superficial. a continuación, hablare un poco del caso de las cuencas de los arroyos Ludueña y Saladillo, estas se encuentran en Argentina. Mediante el uso de las SIG y otras herramientas se quería determinar cómo era el comportamiento del agua en estas cuencas por lo tanto era necesario realizar varios modelamientos. con la información que se encontró de imágenes satelitales y SIG estas permitieron representar con facilidad y una muy buena precisión la variabilidad espacial y con estos poder determinar mapas de CN parámetro necesario para este estudio, fue indispensable para poder analizar y comprender factores como el uso del suelo, la topografía y las condiciones climáticas ya que estas afectan los caudales y la esorrentía. Los mapas de CN generados a partir de imágenes satelitales y datos recopilados a través de sensores satelitales se crearon a partir de la integración de información topográfica y de cobertura del suelo permitiendo realizar una simulación del

comportamiento hidrológico en estas cuencas, dando como resultados donde nos muestran que hay alteraciones en la dinámica del escurrimiento y patrones de infiltración.(Scuderi et al., 2008)

Figura 6.

Uso de imágenes satelitales y SIG en la generación de mapas de CN.

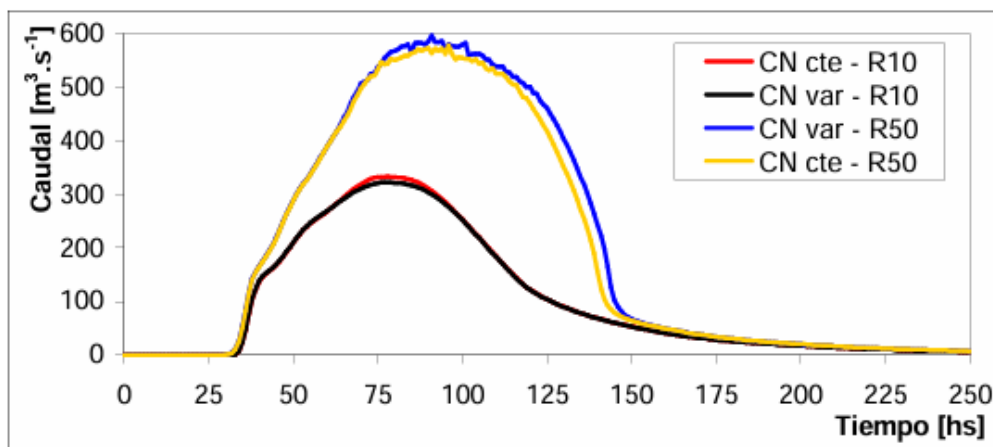
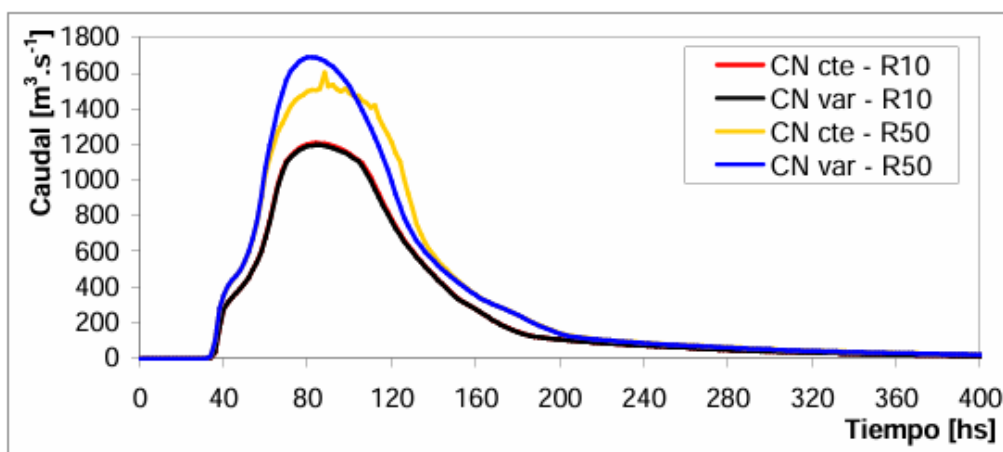


Fig. 11. Cuenca del A° Ludueña.



Fuente: (Scuderi et al., 2008).

La integración de SIG e imágenes satelitales en el análisis hidrológico de las cuencas en Argentina. Ludueña y Saladillo mostraron ser versátiles y una herramienta bastante poderosa a la hora de modelar dichos fenómenos como crecidas y de igual forma planificar las inundaciones, haciendo que el enfoque del uso de las SIG nos ayuden a gestionar los recursos hídricos y a su vez mejorar la representación espacial de dichos parámetros optimizando la obtención de los datos

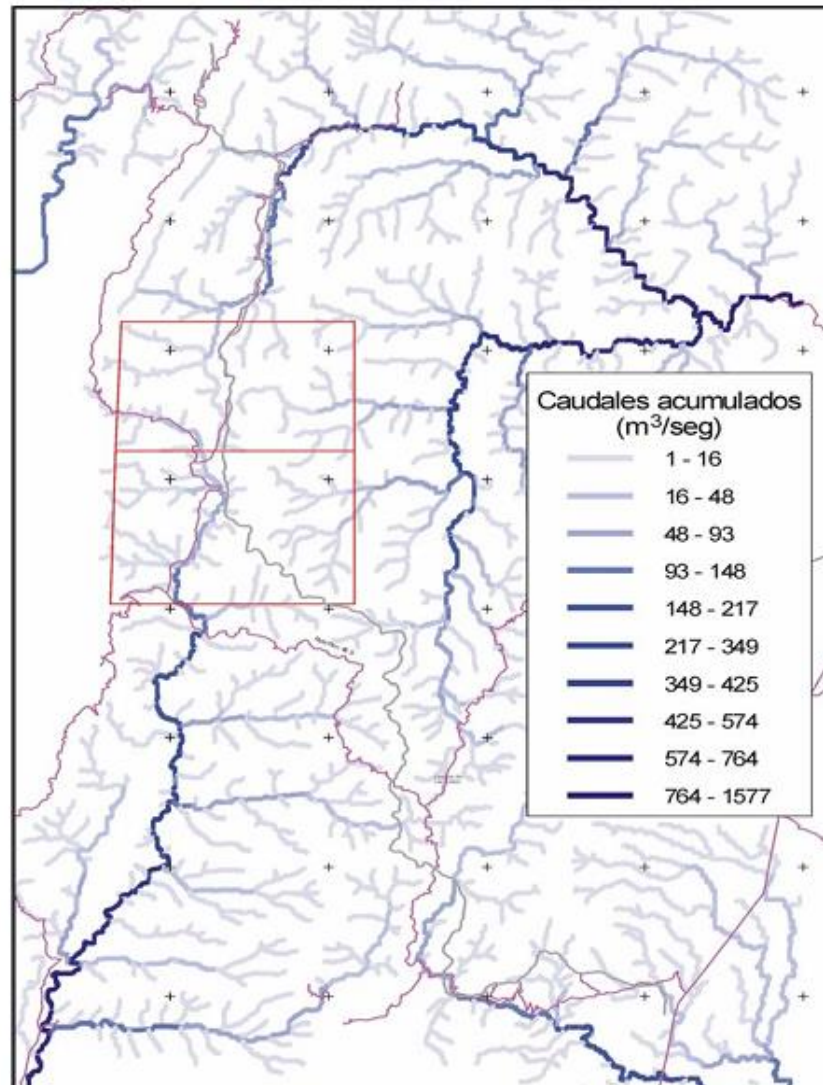
ayudándonos a la precisión y aportando en la implementación de diferentes estrategias para tomar mejores decisiones cuando hablamos de riesgos hidrológicos.

De igual manera también en argentina tenemos el caso del valle de Lerma donde la falta de información y la complejidad topográfica hizo que aplicar las SIG fuera necesario, para esto se requirió usar herramientas para el modelado hidrológico de la zona, el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) fueron necesarios para integrar datos espaciales y climáticos, ayudando a representar fenómenos hidrológicos de alta complejidad y generando mapas detallados. Según Belmonte & Núñez, (2006), estas herramientas son esenciales para abordar desafíos como la estimación de escurrimientos, caudales máximos y pérdida de suelos, contribuyendo a la planificación territorial y la mitigación de riesgos.

Los SIG integraron los datos que se encontraban en las estaciones meteorológicas para modelar temperatura y precipitación de la zona, usando métodos como regresión y adicionando variables como altitud y latitud, y con estos parámetros se generaron mapas digitales para la zona de estudio. También se tuvieron en cuenta otros datos del relieve y vegetación permitiendo ver a más detalle el análisis de precipitaciones escurrimiento superficial lo modelaron mediante "runoff" de Idrisi Kilimanjaro gracias a este modelo se pudo generar una red de drenaje bastante a detalle en donde se puede visualizar como fluye el agua en la cuenca (Belmonte & Núñez, 2006).

Figura 7.

Caudal máximo acumulado sobre la red principal de drenaje (runoff para Q, método CN, para D = Tc).



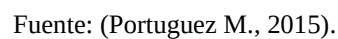
Fuente: (IRNED, 2005)

Para estimar los caudales máximos al igual que en el estudio anterior se utilizó el método de la curva número, ayudando a la obtención de los datos de caudales acumulados en puntos específicos donde se requería esta información dando resultados bastante satisfactorios y útiles a la hora de realizar la planificación de infraestructuras o ya sea para determinar las áreas que son más propensas a ser inundables.

Tenemos que gracias a los aportes de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en combinación con diferentes métodos como la RUSLE y el método de Curva Número les permitió abordar eficientemente los desafíos hidrológicos en esta zona de estudio y otras cuencas vecinas. Los SIG fueron herramientas bastante útiles a la hora de enfrentar estas situaciones superando las limitaciones de información que presentaba la zona integrando información espacial y climática, generando mapas muy confiables donde podemos visualizar de manera más sencilla la información.

Y vimos que las SIG son bastante versátiles a la hora de la integración de datos con muchas metodologías en este caso de la aplicación al río Guarno, en Colombia, cuenca bastante compleja ya que presenta una variabilidad a nivel de alturas e intensas interacciones entre factores y actividades del ser humano, en este caso fueron fundamentales para estimar la escorrentía directa, realizar modelaciones de los comportamientos hidrológicos y la debida planificación de estructuras que controlen inundaciones en esta zona, los datos para determinar esta escorrentía incluyen mapas de red hídrica, cobertura vegetal, uso del suelo y un Modelo Digital de Elevación (DEM), tomados del IGAC y el IDEAM, también se usó el software ArcGIS complementado con ArcHydro y HEC-GeoHMS y gracias a estas extensiones permitieron calcular los valores hidrológicos necesarios (Portuguez M., 2015).

Modelo cartográfico para estimar la escorrentía directa.



Con el software HEC-HMS y teniendo en cuenta el método de curva número se puede transformar la precipitación en escorrentía teniendo en cuenta factores como pendiente, tipo de suelo y la cobertura vegetal que se encuentra en la cuenca, la precipitación se le hace un análisis histórico para generar mapas de isoyetas en diferentes periodos de retorno de 25, 50, 100, 500 y 1000 años, con esta información facilita la estimación de escorrentía en las diferentes zonas de estudio, aplicando el método SCS se ajusta la precipitación para determinar el porcentaje que se convierte en escorrentía, tomando en cuenta diferentes factores como la retención de agua en el suelo y la cobertura vegetal, haciendo que mediante los SIG permitiera simular el flujo de agua

dentro de la cuenca. usando la herramienta ArcHydro, se pudieron procesar los datos para definir la dirección y el estancamiento del flujo, delimitando subcuencas y generando áreas de drenaje. Con esto se pudieron estimar los caudales de escorrentía en los puntos necesarios para el estudio, dando finalmente resultados como que se determinó que los cambios en la cobertura vegetal, ya sea como la deforestación afectan la generación de escorrentía, esto nos muestra que deberían hacerse regularmente estudios que muestren como cambia la zona en los mapas del suelo para mejorar la precisión de los modelos hidrológicos (Portuguez M., 2015).

El análisis hidrológico en cuencas no instrumentadas en la actualidad Sigue siendo un desafío por la poca información que hay de las mismas, y en muchos casos estos datos no son tan confiables debido a la limitada disponibilidad de datos hidrometeorológicos. Se debe recurrir a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y otro parámetro como lo es la percepción remota (PR), a partir de esta necesidad emergen como herramientas que nos ayudan a suplir la falta de información y con esto modelar procesos hidrológicos complejos. Se realizó una revisión y análisis de casos en diferentes países donde se exploraron como los SIG eran integrados con modelos hidrológicos, donde se determinó que a la hora de aplicarlos podrían darnos resultados desde lo más sencillo hasta datos bastante complejos con estos fácilmente se pueden realizar delimitaciones de cuencas hasta procesos con bastante detalle (Mendoza et al., 2002).

La versatilidad de los SIG permiten la integración de datos espaciales y no espaciales para modelar diferentes procesos como escorrentía, balances hídricos y recarga de acuíferos, se usan técnicas como interpolación por origen y promedio móvil que facilitan ver redes de drenaje y distribución espacial, generando mapas de variables como de precipitación, evapotranspiración y humedad del suelo, por otro lado los Modelos hidrológicos espacialmente distribuidos (MHED)

nos permiten simular varios procesos hidrológicos a un detalle nivel pixel y junto a los SIG nos dan una nueva percepción a la hora de evaluar los fenómenos que nos muestran en las cuencas.

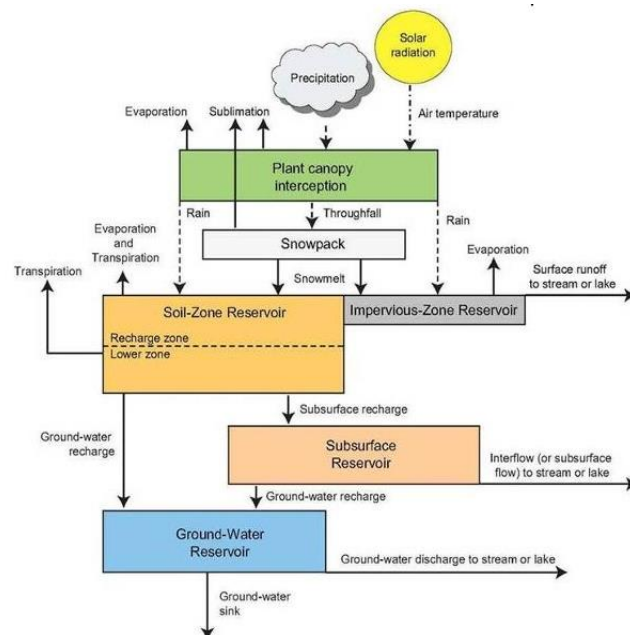
Como vemos mediante los SIG es muy fácil integrar y combinar datos climáticos con múltiple información como la topográfica y geomorfológica, lo que hace que las simulaciones sean más precisas, junto a la integración de imágenes satelitales nos ayuda a estimar otros parámetros esenciales a la hora de hablar de la modelación de cuencas no instrumentadas. sin embargo, en estas cuencas se tienen limitaciones ya que la precisión de los modelos depende de los datos que se encuentran disponibles y muchas veces no son de buena calidad ni resolución haciendo que los datos de entrada no sean tan confiables aun asi los resultados son de ayuda siendo una aproximación de lo que requerimos.

Se ha notado que en países desarrollados han implementado las SIG para evaluar los impactos en la corteza vegetal y los diferentes usos del suelo, de igual manera han diseñado estrategias para conservar las cuencas y una correcta planificación del territorio y sin importar las limitaciones que se puedan presentar gracias a las SIG podemos analizar procesos hidrológicos a detalle proporcionándonos información crucial para la toma de decisiones a la hora de gestionar el agua y los recursos en la zona (Mendoza et al., 2002).

La herramienta GIS proporciona una solución integral para el análisis y la gestión hidrológica al proporcionar diferentes modelos distribuidos que simulan con precisión el comportamiento del agua en cuencas hidrológicas. Este enfoque integra datos como la topografía, el clima y el uso de la tierra para producir hidrogramas detallados, estos lo que nos permite es realizar una gestión optimizada de los recursos hídricos que poseen además de la predicción de riesgos y las decisiones informadas de planificación espacial.

Los SIG son sistemas que nos permiten integrar datos espaciales y no espaciales a al momento de modelar procesos como escorrentía, la recarga de acuíferos y el balance hídrico además de Facilitar la delimitación de cuencas hidrográficas, las redes de drenaje y la distribución espacial de las diferentes variables hidrológicas mediante técnicas como interpolación por origen y promedio móvil (Salamanca Torres, 2022).

Sistema de Modelamiento de Precipitación-Escorrentía.



Fuente: (Salamanca Torres, 2022)

Por último, generando mapas temáticos de variables hidrológicas, como precipitación, evapotranspiración y humedad del suelo, mejorando la representación espacial de estos parámetros, estos modelos permiten simular procesos hidrológicos a nivel de detallado, capturando la variabilidad espacial dentro de la cuenca proporcionando información detallada para la gestión de recursos hídricos en áreas con datos limitados, permitiendo planificar estrategias más precisas (Salamanca Torres, 2022).

Gracias el uso de Los SIG facilitan la combinación de datos climáticos históricos con información topográfica y geomorfológica, lo que mejora la capacidad de evaluar la respuesta hidrológica de las cuencas y adicionando la integración con imágenes satelitales permite estimar variables como evapotranspiración y balance hídrico, esenciales para modelar cuencas no instrumentadas. En países en desarrollo, los SIG han sido utilizados para evaluar el impacto de cambios en la cobertura vegetal y el uso del suelo, diseñar estrategias de conservación de cuencas y planificar el uso del territorio en donde la precisión de los modelos hidrológicos distribuidos depende de la calidad y resolución de los datos de entrada, lo que puede ser un desafío en regiones con pocos datos observados.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han transformado notoriamente el análisis hidrológico al permitirnos modelar y también comprender los procesos en áreas con información limitada. Ya que estos enfoques no sólo apoyan la planificación espacial sino también la protección ambiental, optimizando la gestión sostenible del agua.

Ahora no todo es así de sencillo, sabemos que los SIG tienen algunas limitaciones por lo tanto debemos tener en cuenta que al momento de realizar la parametrización y la calibración de estos modelos con la limitada información de datos que poseemos puede llegar a ser no tan certera como nos gustaría, por lo tanto, para realizar esta actividad necesitamos personal capacitado que

pueda llevar a cabo dicha acción de manera eficiente. Esto nos demuestra una vez más que aun estos métodos no están al 100% de su capacidad así que podemos ver que constantemente estos están mejorando para que exista una mayor resolución a la hora de ver los datos disponibles. Aun sin tener en cuenta estas limitaciones, los métodos distribuidos hechos a partir de los SIG continúan siendo una solución bastante practica para el análisis de los procesos hidrológicos a escalas regionales y nacionales, proporcionando información bastante relevante al momento de tomar decisiones ya sea para la gestión de los recursos hídricos o para la planificación espacial.

En la actualidad, los GIS se han estado integrado con diferentes herramientas de modelado hidráulico como lo es SWMM y SewerGems estas nos ayudan a evaluar redes de alcantarillado. Ya que los SIG se utilizan para gestionar y administrar importantes datos espaciales relacionados con las aguas residuales, evaluando el comportamiento hidráulico y proponiendo soluciones a los problemas de drenaje urbano. El crecimiento urbano y el clima extremo hace que se planteen situaciones críticas cuando hablamos de la gestión de las redes de alcantarillado. Así que al integrar los SIG con modelos hidráulicos como lo es SWMM y SewerGems, estos pueden analizar las redes de drenaje en áreas de interés para determinar su debido desempeño.

Luego se exportan los datos obtenidos de ArcGIS a la herramienta SWMM y SewerGems ahora utilizando scripts Python .se deben incluir los pozos, las tuberías y por ultimo las áreas de drenaje en este modelo de simulación, con esto se pueden construir redes de aguas residuales de manera más eficiente. La integración entre estas herramientas nos permite el modelado hidráulico teniendo en cuenta diferentes condiciones de la lluvia, permitiendo que se realice la evaluación del funcionamiento del sistema de las aguas residuales en función del flujo, la velocidad y la altura

En el proceso se realizaron varias tomas de datos mediante el monitoreo para poder registrar los datos de caudal y la lluvia en tiempo real. Estos datos se utilizaron para calibrar y

validar los modelos, asegurando que las simulaciones fueran consistentes con las observaciones que se habían realizado. Mediante el análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo, como el porcentaje de áreas impermeables y el coeficiente de rugosidad, permitió identificar los factores que más influían en la respuesta hidráulica del sistema. Se analizaron eventos de precipitación con periodos de retorno de 2 y 10 años, generando mapas que muestran el comportamiento hidráulico del sistema bajo condiciones extremas donde se revelaron zonas vulnerables a inundaciones y deficiencias en la capacidad hidráulica de ciertas tuberías, lo que permitió proponer soluciones basadas en la ampliación de diámetros y la construcción de nuevos colectores (Salamanca Torres, 2022).

En ciudades en crecimiento como Tunja, la gestión eficiente de los sistemas de alcantarillado son clave para prevenir inundaciones y la optimización del drenaje urbano. Se aborda el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en conjunto con herramientas de modelación hidráulica como SWMM y SewerGems para analizar redes de alcantarillado en dos distritos urbanos: Casa Verde y La Villita. Los SIG facilitaron la identificación de zonas con altas tasas de escorrentía, principalmente asociadas a áreas impermeables y la Simulación de eventos extremos hicieron que se detectaron deficiencias en el sistema de alcantarillado bajo lluvias intensas, como desbordamientos en puntos críticos (Salamanca Torres, 2022).

El uso combinado de sistemas de información geográfica (SIG) con herramientas de modelización hidráulica proporciona un enfoque integral para el análisis y gestión de los sistemas de aguas residuales urbanas. Este enfoque no sólo optimiza el diseño y las operaciones de la red, sino que también facilita la planificación de infraestructura sostenible para ciudades en expansión. Esta integración es particularmente útil en ciudades no tan grandes donde la gestión de aguas pluviales y aguas residuales es una necesidad bastante importante. Los resultados obtenidos del

modelo SWMM mostraron que algunas tuberías ya habían alcanzado el 100% de su capacidad durante los eventos extremos, provocando desbordamientos en los puntos críticos. Los SIG son herramientas que facilitan la superposición de mapas de flujo y el nivel de agua en la infraestructura urbana, haciendo que sea fácil identificar las áreas más vulnerables y propensas a las inundaciones (Salamanca Torres, 2022).

Podemos ver en este estudio que la combinación de SIG y los modelos hidráulicos demostraron ser una herramienta importante a la hora de planificar y gestionar las redes de tuberías de alcantarillado en las ciudades centrales. Así que podemos ver la importancia de los SIG a en el momento de tomar decisiones sobre el diseño, el mantenimiento y la expansión de la infraestructura hídrica.

Así como veíamos anteriormente el uso de las SIG. en el sistema de alcantarillado también podemos ver que se aplican en sistemas de drenaje pluvial, teniendo esto en cuenta podemos analizar el caso de Luanda ya que ha existido un gran crecimiento urbano ha provocado problemas críticos en la gestión de drenaje pluvial. Este estudio propone una estrategia basada en modelos digitales del terreno y herramientas SIG, aplicados al barrio Marçal como caso de estudio.

Se aborda la estrategia para el diseño de redes de drenaje pluvial mediante modelación matemática aplicada a la ciudad de Luanda, Angola. se presenta un análisis enfocado en el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y su integración en la hidrología

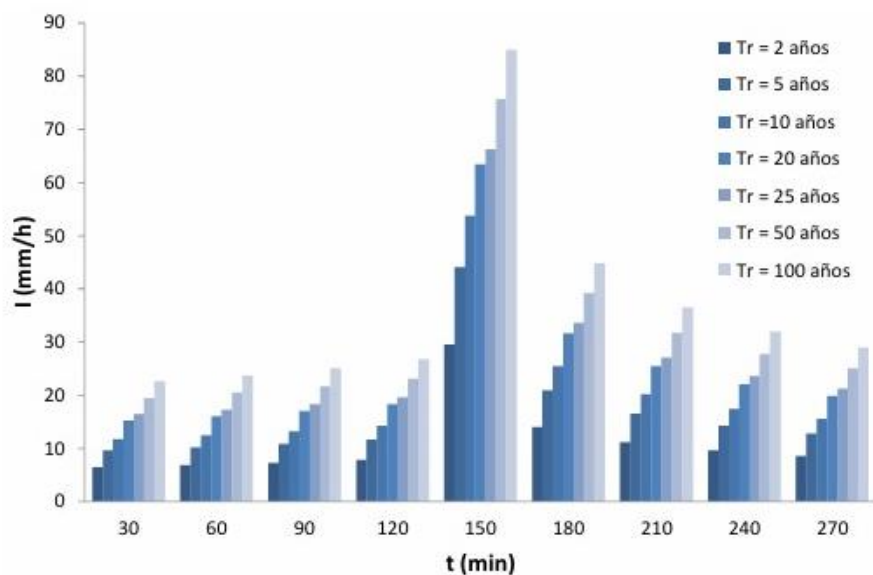
La construcción de modelos digitales del terreno (MDT) es esencial para simular procesos hidrológicos y evaluar el drenaje pluvial. También para crear los modelos digitales del terreno (DTM) para estos se utilizan datos de diversas fuentes, ya sean estudios topográficos, GPS y de tecnología LIDAR. Una vez teniendo estos datos se integran en un sistema de información geográfica (SIG) y con estos delimitar las cuencas hidrográficas, también analizar patrones de

flujo y por último calcular parámetros físicos como la pendiente y la dirección. Haciendo que este enfoque facilite la planificación y el diseño de las redes de drenaje (Da Silva, 2015).

Los datos obtenidos mediante los MDT se interpolan y luego se suavizan para reflejar con una mayor precisión de las áreas urbanas, lo que es particularmente importante para zonas bajas como Luanda. Mediante los SIG se pueden modelar los fenómenos espaciotemporales como lo son las aguas pluviales y las inundaciones, siendo de grandes ayudas a la hora de evaluar los peligros y las vulnerabilidades en las áreas urbanas, con estas herramientas se generan los mapas de escurrimiento, los hidrogramas y los mapas topográficos que muestran como es el comportamiento del agua bajo diferentes escenarios de lluvia (Da Silva, 2015).

Figura 10.

Hietogramas - sintéticos para diferentes periodos de retorno.



Fuente: (Da Silva, 2015).

Los sistemas de información geográfica (SIG) que podemos usar en este momento aún no están completamente adaptados para realizar análisis hidrológicos a una gran profundidad o de manera intensivas, especialmente cuando hablamos del preprocesamiento de modelos digitales del

terreno (DTM). en zonas como Luanda, la integración efectiva de SIG con modelos hidráulicos se hace algo complicada ya que la falta de datos confiables no da mucha seguridad al momento del análisis.

En este ejemplo, MDT se utiliza para modelar el terreno, identificar zonas críticas de inundación y diseñar una red de drenaje eficiente. Se han utilizado modelos como SWMM y SewerUp, que combinan análisis SIG con modelización hidrológica, para validar proyectos y estimar los costos asociados. La implementación de SIG en hidrología urbana es fundamental para resolver los problemas de escasez de datos y crecimiento urbano. Sin embargo, para mejorar el análisis hidrológico en áreas urbanas es necesario desarrollar herramientas más especializadas (Da Silva, 2015).

El estudio destaca que, al combinar sistemas de información geográfica con modelos matemáticos, se puede optimizar el diseño y la gestión de las redes de tuberías de aguas pluviales para proporcionar soluciones más efectivas para las ciudades en crecimiento. Su aplicación en Luanda podría servir de modelo para otras ciudades con problemas similares. Sería fantástico si pudiéramos invertir en tecnología y formación para mejorar la calidad de los datos del terreno facilitando la integración de los SIG en los proyectos de planificación urbana. (Da Silva, 2015).

Los SIG se han convertido en herramientas indispensables en el análisis y diseño de sistemas hidrológicos, especialmente en ambientes urbanos donde los desafíos incluyen el crecimiento desordenado, la impermeabilización del suelo y los fenómenos extremos de lluvia. Estas herramientas permiten, Modelar fenómenos hidrológicos complejos Combinan datos espaciales (topografía, uso del suelo) y temporales (lluvias, escurrimientos) también nos permite Evaluar riesgos Identificando zonas vulnerables a inundaciones y proponer estrategias de

mitigación e Optimizando recursos facilitando el análisis costo-beneficio para el diseño de infraestructuras.

Por otro lado, el Rol del Modelo Digital del Terreno (MDT), es una representación numérica de la topografía que es fundamental para cualquier análisis hidrológico basado en SIG. Este modelo se utiliza para, Delimitar cuencas hidrográficas, Simular flujos superficiales y subterráneos (Da Silva, 2015).

Para empezar con este proceso se realiza una recopilación de datos, Fotografías aéreas, datos LIDAR, GPS y mapas topográficos luego se hace la Interpolación para crear mallas regulares y suavización de datos y por último se realiza la Comparación con datos de campo y mapas existentes para asegurar precisión. En el caso del Barrio Marçal en Luanda, el MDT fue crucial para identificar áreas críticas de inundación y planificar redes de drenaje, Creando simulaciones detalladas de lluvias y escurrimientos y Evaluando impactos de diferentes escenarios de precipitación en infraestructuras existentes diseñando redes optimizadas de drenaje pluvial basadas en datos espaciales y temporales (Da Silva, 2015).

La herramienta SWMM (Modelo de Gestión de Aguas Pluviales) es un programa que modela el ciclo de la precipitación, también crea hidrogramas para evaluar la respuesta de las cuencas urbanas y que nos permiten realizar un análisis de la capacidad de las redes de drenaje. SewerUp esta herramienta fue una valiosa pieza para el diseño y la validación de las redes de drenaje, que siendo complemento a los sistemas de información geográfica (SIG) se puede realizar el análisis teniendo en cuenta los parámetros económicos y el diseño. La integración de SIG con herramientas como SWMM y los modelos digitales del terreno (DTM) hizo más fácil el modelado en áreas en donde se tenía poca información, Esto les permitió realizar una predicción y a su vez evaluar resultados, haciendo que el proceso de toma de decisiones fuese más sencillo.

En el ámbito de los SIG uno de los sistemas que más destaca es HidroSIG este fue desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia. La plataforma es capaz de integrar herramientas avanzadas para llevar a cabo el análisis hidrológico, la gestión de los recursos naturales y la modelación ambiental siendo así particularmente efectiva para modelar fenómenos como hidrológicos, hidro climáticos y geomorfológicos (Velez et al., 2002).

HidroSIG esta es una plataforma modular siendo su escritura realizada en Java que puede dividirse entre herramientas básicas, especializadas y de igual manera más avanzadas. Esta se conecta a bases de datos a través de JDBC y puede manejar una gran cantidad de datos espaciales y temporales, como tenemos el caso de los modelos de elevación digitales (DEM), también mapas ráster y diferentes datos climáticos. Teniendo en cuenta que es compatible con diferentes formatos de datos como lo son ASCII, DXF y shapefiles, esto hace que sea fácil integrar la información de múltiples fuentes.

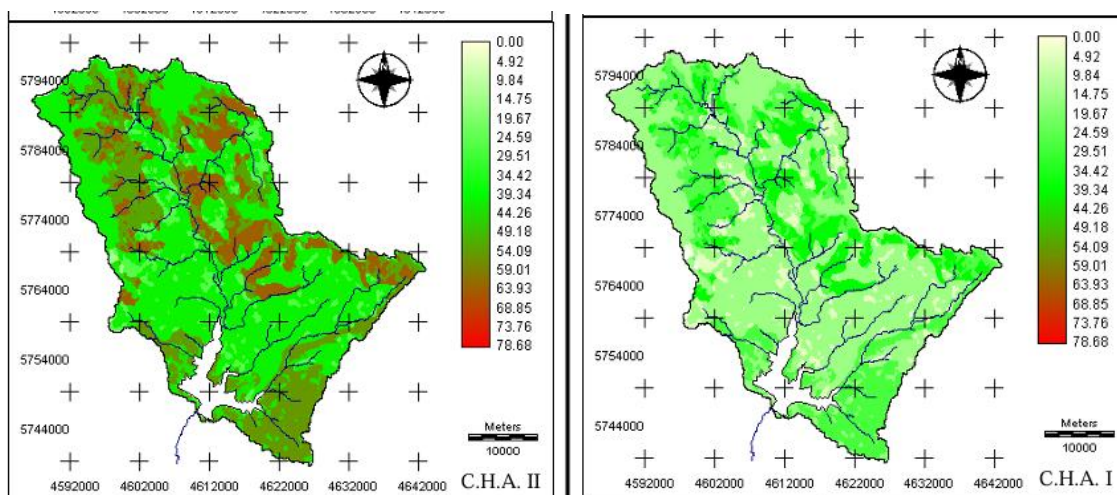
Los sistemas de georreferenciación y coordenadas son la base de HidroSIG, ya que acepta la integración de múltiples sistemas geodésicos (como UTM y latitud y longitud), lo que permite que se realice una mejor proyección de datos espaciales. Una de sus características más notorias es que puede incluir los módulos avanzados de corrección DEM, como, por ejemplo: la eliminación de sumideros y el dibujo automático de las redes de drenaje, que son necesarios para el modelado hidrológico. También facilita el análisis de las series temporales necesarias para detectar valores atípicos y para garantizar la homogeneidad de los datos hidrológicos. Nos puede proporcionar un procesamiento bastante avanzado de imágenes satelitales usando los algoritmos de clasificación de imágenes LANDSAT y Spot ya sean supervisados y no supervisados, ampliando sus aplicaciones en la investigación de los recursos ambientales y recursos hídricos.

HidroSIG es una herramienta que permite realizar simulaciones de procesos en cuencas mediante modelos distribuidos como SHIA, y la capacidad que tiene para modelar el transporte de contaminantes en ríos a partir de fugas o derrames puntuales es un plus en este caso. Haciendo que HidroSIG sea una herramienta muy integral para la gestión de los recursos hídricos, enfrentando diferentes situaciones relacionadas con el cambio climático, la calidad del agua y el transporte de sedimentos por las cuencas hidrográficas (Velez et al., 2002).

De igual manera tenemos que la herramienta GeoQ está diseñada para calcular la escorrentía superficial a partir del método del Número de Curva (NC), que funciona de manera automática generando mapas de escorrentía para una gran variedad de condiciones de humedad previas. Esta herramienta sea aplico a cuatro cuencas hidrológicas de Buenos Aires (Argentina), esto les dio como resultado la creación de mapas detallados que muestran la distribución espacial de las capas superficiales, teniendo esto en cuenta hace que el análisis entre estos parámetros sea mucho más sencillo considerando la relación entre precipitación, infiltración y acumulación superficial. El GeoQ es una herramienta que se destaca por su adaptabilidad, naturaleza de código abierto y practicidad para la planificación y la gestión ambiental, haciendo más fácil al evaluar los impactos del suelo y el agua bajo diferentes condiciones climáticas.(Rodríguez & Gaspari, 2014).

Figura 11.

Rodríguez Vagaría, A. y Gaspari, F. (2010): “GeoQ: Herramienta para la determinación del número de curva y escorrentía bajo entorno SIG. Idrisi Andes®”, GeoFocus (Informes y comentarios), nº 10, p.11-26. ISSN: 1578-5157.



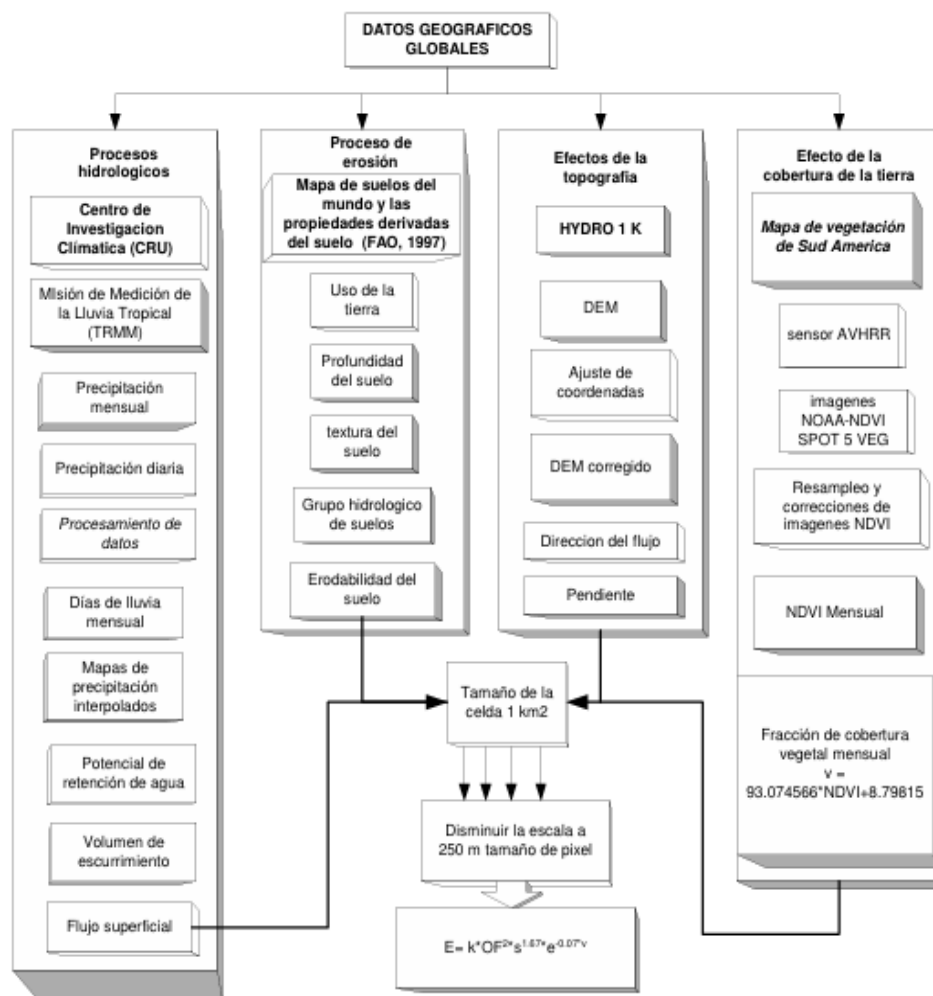
Nota: Mapas de escurrimiento según condiciones de humedad antecedente obtenidos por GeoQ para la cuenca del Río Sauce Grande.

Los sistemas de información geográfica (SIG) están siendo bastante usados en la evaluación de la erosión y la sedimentación a escalas regionales, realizando integraciones eficazmente datos climáticos, edáficos y topográficos para modelar procesos hidrológicos complejos. En este estudio, se utiliza SIG en la región andina de Cochabamba, Bolivia, para delimitar áreas clave y aplicar modelos distribuidos como RUSLE3D, Thornes y Morgan. La capacidad de los SIG para procesar grandes cantidades de datos espaciales e integrarlos con información de sensores remotos ha producido mapas de riesgo detallados de erosión hídrica, acumulación de sedimentos y transporte superficial.

Este enfoque hace una contribución Significativa a la gestión integrada de cuencas y la planificación espacial sostenible, ayudando a mitigar los efectos negativos de la erosión y mejorar la gestión de los recursos hídricos en la región (Saavedra & Mannaerts, 2015).

Figura 12.

Flujograma del modelo geomórfico de erosión de Thornes usando datos globales de sensores remotos dentro de un SIG a escala regional.



Fuente: (Saavedra & Mannaerts, 2015)

Así que podemos decir, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) nos ayudan a integrar una amplia gama de parámetros tanto espaciales y como no espaciales como el clima, la topografía, el uso del suelo y las diferentes características del suelo. Esta capacidad que tiene de integrar fuentes de información diversa convierte a los SIG en una herramienta extremadamente versátil para modelar, para analizar y para visualizar datos complejos. Además, los SIG permiten la modelización hidrológica a detalle, también el reconocimiento de patrones espaciales, la evaluación de riesgos y la creación de mapas temáticos que ayudan a explicar y entender mejor los procesos como la escorrentía, la infiltración y la erosión hídrica. La flexibilidad que posee y precisión los convierten en herramientas importantes cuando hablamos de la planificación espacial, la gestión del agua y la investigación sobre la reducción de riesgos ambientales, siendo adaptadas a diferentes escalas y contextos.

Los estudios hidrológicos, aunque parezca raro no sólo las precipitaciones sino también los eventos como la sequía que también afectan a la cuenca. Así que mediante modelos hidrológicos se pueden tanto analizar, como caracterizar a detalle las cuencas semiáridas. Los SIG hacen mucho más fácil este trabajo, realizando una extracción automatizada de las redes de drenaje y el acceso a atributos del terreno, como las pendientes, la acumulación de escorrentía y los límites de las cuencas hidrográficas. Una vez obtenidos los datos estos se integran en modelos hidrológicos distribuidos que teniendo en cuenta la topografía y el uso de la tierra en la zona, lo que permite modelar con mayor precisión los fenómenos como la escorrentía y el escurrimiento (S. G. García et al., 2002).

Los modelos integrados SIG permiten modelar la propagación del flujo a través de paisajes e hidrología distribuida, lo cual es valioso para comprender cómo las condiciones climáticas y los cambios en el uso de la tierra afectan el equilibrio hídrico de una cuenca. Esta característica no

sólo mejora la precisión del análisis hidrológico, Pero también proporciona una herramienta fundamental para predecir el impacto de fenómenos extremos como inundaciones o sequías.

Creo que esta tecnología puede optimizar la gestión del agua, garantizar su sostenibilidad y contribuir a una planificación espacial más sostenible frente a los desafíos del cambio climático.

Ahora por último también suelen combinado de métodos hidrometeorológicos, modelización hidráulica y herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) para estimar caudales de avenidas y delimitar áreas inundables como tenemos el caso de Murcia, La Región de Murcia presenta características geográficas y climáticas particulares: cuencas pequeñas con pendientes pronunciadas y un régimen de precipitación irregular que genera fenómenos torrenciales esporádicos. Estas condiciones plantean riesgos Significativos de inundaciones, especialmente en las ramblas costeras que drenan directamente al Mediterráneo. El área de estudio abarca cuencas de tamaños variados, con especial énfasis en aquellas afectadas por tormentas extremas (García Lorenzo & Conesa García, 2011).

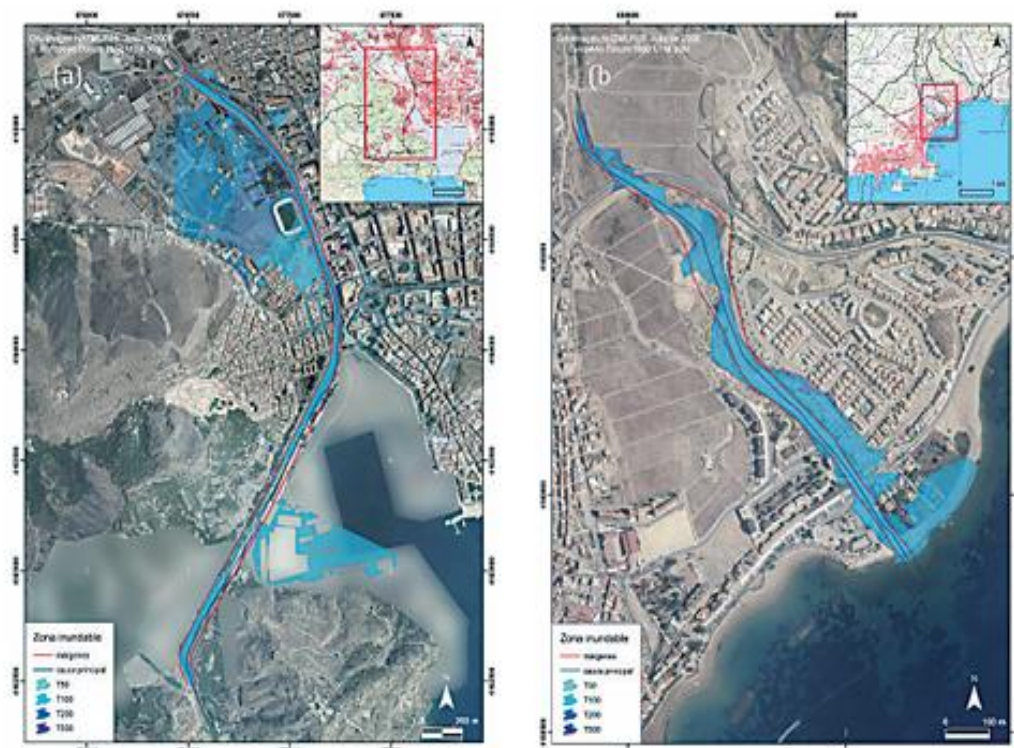
El estudio comenzó recopilando datos de precipitación de estaciones meteorológicas locales, centrándose en los datos históricos de precipitación diaria máxima. Estos datos se complementan con modelos digitales de elevación (DEM) y datos existentes sobre las características físicas y el uso del suelo de la zona. Luego, se utilizan herramientas avanzadas como el hidrograma de bloques del Mar Meridional de China y el método racional modificado para realizar modelos hidrológicos, adaptarse a las condiciones locales y analizar las relaciones lluvia-escorrentía.

En una etapa posterior, se crea un modelo hidrológico utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG). Mapa detallado. Precipitaciones, pendiente, llanura aluvial y vulnerabilidad, proporcionando una clara representación espacial del riesgo. Finalmente, el

análisis automatizado utilizando extensiones como ArcHydro y GeoRAS permite la integración de resultados hidráulicos y proporciona una base sólida para la gestión del riesgo de inundaciones y la planificación espacial (García Lorenzo y Conesa García, 2011).

Figura 13.

Delimitación de áreas inundables en las ramblas de Benipila (a) y de Los Lorentes (b) obtenidas con hEC-GeoRAS para diferentes tiempos de retorno.



Fuente: (García Lorenzo & Conesa García, 2011)

El análisis nos permite evaluar la efectividad de combinar herramientas SIG con modelos hidrológicos e hidráulicos para la gestión de riesgos principalmente relacionados con el agua. Sin embargo, también enfrentamos algunas limitaciones importantes, como la calidad insuficiente de los modelos digitales de elevación (DEM) y los registros de precipitación. Estos parámetros no permiten que la calidad de los resultados sea muy buena, por lo que es necesario mejorar la recopilación de esta información para su posterior análisis y procesamiento de estos datos como

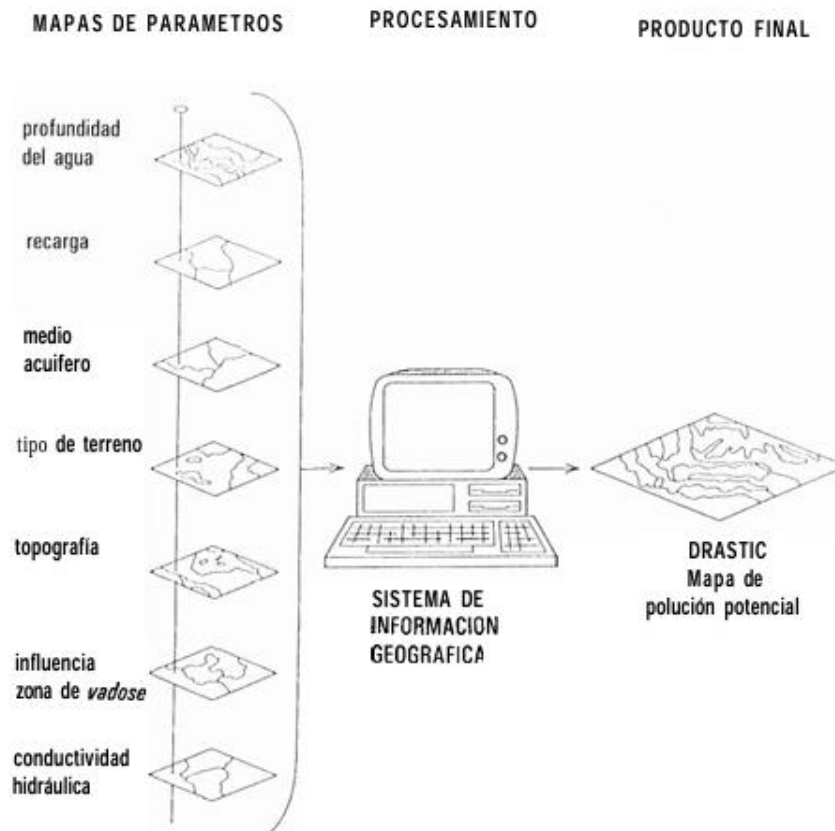
se mencionó anteriormente. Además, el método utilizado en este estudio sólo es válido para colecciones pequeñas y medianas, por lo que, si son más grandes, el método ya no es útil y se deben buscar más métodos alternativos para determinar estos valores.

El desarrollo de SIG que apoya la integración de herramientas ha transformado la investigación ambiental, principalmente en los campos de la hidrología y el monitoreo de recursos naturales. Ha habido un mayor desarrollo en la implementación de modelos hidrológicos y geomorfológicos basados en estas herramientas SIG. Permiten analizar procesos como la escorrentía superficial, el riesgo de inundaciones (muy importante hoy en día) y la degradación del suelo.

El uso continuo de modelos digitales de elevación (DEM) ha facilitado la creación de mapas de elevación. Se identificaron los sistemas de drenaje, los modelos de inundaciones y las áreas vulnerables. Claramente estos sistemas son fundamentales cuando hablamos del análisis y cómo podemos comprender la dinámica del paisaje haciendo que predecir los eventos extremos sea más fácil, lo que hace que por medio de la planificación ambiental y la reducción de riesgos sean altamente efectivas en estas zonas. Herramientas como el método DRASTIC también han demostrado ser relevantes para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, incluida la topografía, la Conductividad hidráulica y las tasas de recarga en condiciones en las que GIS ha demostrado ser una herramienta bastante eficaz. Por lo tanto, el uso de SIG no sólo ayuda en gran parte a representar espacialmente datos bastante complejos, sino que también nos permite desarrollar buenas estrategias sostenibles cuando hablamos de la protección de los ecosistemas (CC García, 1996).

Figura 14.

Integración del modelo DRASTIC en un SIG. Esquema conceptual.



Fuente: (C. C. García, 1996).

Podemos visualizar que los SIG es pieza fundamental cuando hablamos del desarrollo de la investigación ambiental, que como podemos darnos cuenta nos ofrece muchas ventajas a la hora de hablar del análisis y la gestión ambiental. Estas herramientas son capaces de ofrecernos mucha información espacial y realizando tareas bastante complejas, como el modelado de cuencas hidrográficas, la evaluación de áreas peligrosas y el modelado de procesos naturales, mejorando enormemente la manera tomar decisiones cuando hablamos de la planificación y la gestión de recursos naturales. Aún así parámetros importantes como los MDEM y los datos meteorológicos de alta calidad seguirá siendo un desafío. La calidad y resolución de estos datos determina la cantidad y validez de los resultados producidos, lo que puede llevar a situaciones adversas si su

confiabilidad no es precisa o no representa dónde se construye la solución. Por tanto, para no perder la mayor cantidad posible de potencial de uso de los SIG, la prioridad no es sólo mejorar la calidad de la información, sino también mejorar su calidad. Pero también se toman medidas menos que ideales para verificar y calibrar la información para reducir errores y utilizarla para proporcionar soluciones precisas a problemas de gestión ambiental en condiciones normales.

Discusión

Durante el proceso de escritura de esta monografía me permitió poder explorar a una mayor profundidad cómo los sistemas de información geográfica (SIG) y los avances que han tenido a través del tiempo están transformando todo lo que se relaciona con el análisis hidrológico, esta herramienta facilita la investigación sobre diferentes procesos complejos, la gestión de varios recursos hídricos y por último la reducción de riesgos asociados a diferentes eventos hidrológicos extremos. Los SIG proporcionan en cualquier análisis una base sólida que nos ayuda a integrar datos espaciotemporales en un solo entorno. Adicional a esto tenemos que es tan versátil que nos permite combinarlos con herramientas como ArcGIS, HEC-HMS, HidroSIG y otros diferentes modelos distribuidos, así que con esto es posible representar los diferentes datos espaciales de las cuencas y de igual manera optimizar el análisis de parámetros esenciales como lo son la Escorrentía, la precipitación, la evaporación y la utilización del suelo. Haciendo que este enfoque sea particularmente valioso tanto en cuencas donde tenemos datos o en cuencas no instrumentadas al igual que en áreas con datos limitados, donde mediante los SIG nos ayudan a estimar con precisión parámetros fundamentales para el análisis de las mismas.

Creo que la herramienta de los SIG es muy buena para simular escenarios de cambio de agua ya que nos proporciona una gran variedad de datos, además es muy importante si lo vemos a nivel en un contexto global en donde podemos caracterizar los datos por el cambio climático ya que en este momento es bastante variable y existe un aumento de eventos extremos como las inundaciones y de igual manera sequías. Estas herramientas nos permiten una planificación estratégica y también la conservación de recursos de la naturaleza. Además, ya que la información que tenemos es aún limitada para muchos proyectos, mediante los SIG nos han demostrado ser

una herramienta lo suficiente valiosa para obtener aproximaciones y simulaciones en diferentes casos de estudios.

Durante la revisión de la información pude notar varias cosas, principalmente observe que las SIG son aplicadas en el análisis de cuencas hidrográficas donde se requieren otras herramientas adicionales como es el caso de HEC-GeoHMS o ArcHydro necesarias para definir redes de drenaje y calcular diferentes parámetros geomorfológicos, también es bastante usual que se usen los SIG para realizar simulaciones de escorrentía donde se crean modelos como el método del número de curva y este se hace a partir de la integración con los SIG haciendo que sea posible convertir precipitaciones en escorrentía teniendo en cuenta también las características del suelo.

Los SIG por lo que se pudo apreciar también son usados en estudios donde se desea determinar la vulnerabilidad de las zonas y tener mayor gestión de riesgos, esto se lleva a cabo a través de mapeos en las áreas más vulnerables en donde se pueden presentar inundaciones, deslizamientos de tierra u otros eventos extremos, así que mediante el uso de los SIG nos proporciona una base para generar estrategias para poder mitigar dichos eventos.

Otra de las facilidades de las SIG es que nos permite realizar una representación espacial de las variables hidrológicas, para así mejorar la toma de decisiones en la gestión espacial y una buena planificación de los recursos hídricos, destacando su importancia como herramienta interdisciplinaria. Aun así a pesar de ser tan beneficioso el uso de las SIG estos también presentan ciertas limitaciones como por ejemplo que dependen de los datos que ya tienen, siendo así que muchas veces los datos que encontramos no son confiables ya que pueden no ser claros o existe ausencia de los mismos haciendo que las modelaciones o los datos gestionados no tengan una alta confiabilidad creando incertidumbre de los modelos creados.

Por otro lado además de la ausencia de datos también es importante que el personal que esta cargo de llevar a cabo el proceso con los sistemas de información este capacitado para realizar dichos modelos ya que eso también puede generar varios errores a la hora de entregar los balances requiriendo altos niveles de experiencia técnica este aspecto enfatiza la necesidad de fortalecer las redes de monitoreo hidrológico y capacitar a expertos para que realicen el correcto uso de estas herramientas.

Ahora también note que hay varias innovaciones que pueden replicarse en diferentes proyectos como el uso de teledetección que se realiza mediante la integración de imágenes satelitales que mediante a los SIG permiten ver el análisis de cambios en la cobertura vegetal y evaluación de la vulnerabilidad de cuencas, también es importante resaltar los modelos de transporte de contaminantes que con el sistema de Hidrosol nos permite realizar modelaciones para determinar los contaminantes en las redes de agua y por último la capacidad que poseen los SIG para modelar los procesos hidrológico a un nivel de detalle lo suficientemente pequeño haciendo que sea más precisa.

Estos métodos no sólo enriquecen el análisis hidrológico, sino que también podemos ver la versatilidad de los SIG ya que abren nuevas perspectivas para resolver diferentes problemas ambientales y climáticos a nivel mundial, teniendo en cuenta que se pueden implementar con múltiples herramientas en diferentes campos de estudio. Así que los SIG nos muestran que son una herramienta fundamental para garantizar la gestión sostenible de los recursos hídricos. Los mapas generados y los análisis resultantes proporcionan una base científica muy buena para optimizar el uso del agua y poder prevenir desastres naturales en el futuro. No obstante, estas herramientas deben ir acompañadas de medidas educativas y regulatorias para garantizar su uso eficaz.

Como autora de esta monografía, desde mi punto de vista siento que los SIG deben utilizarse no sólo como una herramienta técnica, sino también tenerla en cuenta como base para proyectos permitiéndonos gestionar nuestros trabajos de manera responsable ya que mediante los SIG podemos predecir eventos futuros. También me gustaría destacar que los SIG son herramientas que en este momento son fundamentales en el análisis hidrológico moderno ya que posee una capacidad para integrar, analizar y visualizar los datos espaciotemporales, convirtiéndose en un gran aliado estratégico a la hora de enfrentar los desafíos del cambio climático y para garantizar una adecuada gestión de los recursos hídricos naturales. A medida que los SIG y otras herramientas Sigam evolucionando, su impacto y efectividad van a ser mucho mayores y seguirán siendo relevantes en la gestión del agua, simulaciones y prevención de futuros fenómenos.

Conclusiones

Considero que después de analizar los estudios que se han realizado a partir de los SIG, el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) son esenciales y nos permiten realizar diferentes proyectos ya que tienen la capacidad de modelar, mapear y planificar espacialmente varios fenómenos hidrológicos en la gestión de recursos hídricos. Encontramos múltiples ventajas de estos sistemas ya que nos permiten simular una variedad de fenómenos naturales que son bastante complejos como las escorrentías, las inundaciones y por último las sequías. Estos modelos nos proporcionan herramientas fundamentales para prevenir los riesgos asociados a los cambios climáticos. A medida que se vayan mejorando las técnicas de modelado y la calidad de los datos SIG avanzando, los SIG seguirán desempeñando un papel importante en la gestión del agua para que llegue a ser más sostenible en el futuro.

Los SIG nos mostraron que son una herramienta importante a la hora de comprender y de gestionar los recursos hídricos. Ya que estos poseen una gran capacidad de analizar eficientemente datos espaciotemporales que ayudan a predecir los posibles escenarios de cambio climático, esto lo que hace es ayudarnos enormemente a prepararnos para los posibles problemas que podamos llegar a enfrentar, ya sea debido a fenómenos naturales u otros factores externos.

Estos sistemas de información son muy completos y se basan en diferentes fuentes como imágenes de satélite, modelos del terreno y datos climáticos. Nos permiten crear mapas y modelos que nos ayudan a comprender mejor diferentes aspectos del ciclo del agua, elevación, precipitación, etc. Territorio, etc. A partir de estos datos podemos identificar cuencas hidrológicas, evaluar el riesgo de inundaciones y sequías y planificar el uso sostenible del agua.

La combinación de SIG y modelos hidrológicos avanzados nos permite ejecutar simulaciones que observan el comportamiento del agua a un nivel muy detallado, incluso hasta la

escala de píxeles. Estos hechos detallados nos brindan información importante que nos ayuda a tomar decisiones más precisas y seguras sobre la construcción de infraestructura de conservación de agua, reducir posibles riesgos y mejorar la eficiencia operativa del sistema.

Si bien los avances anteriores que estamos viendo son muy buenos, gracias a los avances en los SIG en el análisis hidrológico, creo que aún no están lo suficientemente desarrollados y, por lo tanto, no nos brindan tanta información como la que utilizamos para definir el modelado y el pronóstico preciso. Desafortunadamente, la mayor parte de la información contenida en los sistemas de información no coincide con los datos reales, por lo que los datos que hemos adquirido Siguen siendo umbrales, y en muchos casos no lo son. No es lo suficientemente detallado ni completo, razón por la cual los modelos y los modelos no son completamente confiables.

A pesar de la falta de información, los SIG Siguen siendo una herramienta muy útil porque nos proporciona una forma más realista y útil de analizar estos fenómenos y así identificar datos en lugares escasos o difíciles de obtener. Creo que la calidad de los datos mejorará con el tiempo, haciendo que los modelos SIG sean cada vez más precisos y más fiables de usar. Por tanto, aunque los resultados obtenidos a partir de los SIG no siempre son del todo fiables, nos aportan seguridad. Proporciona una base para la toma de decisiones en nuestro trabajo y contribuye a una mejor gestión de nuestros recursos naturales y a la comprensión de los fenómenos actuales.

Referencias

- Aldana Flores, D. A., & Leigue Fernández, M. A. (2022). *ESTUDIO HIDROLÓGICO PARA DETERMINACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO DE LA CIUDAD DE TARIJA, BOLIVIA*.
<http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/3213>
- Barragán, R. Z. (2013). *MODELADO HIDROLOGICO DISTRIBUIDO DE LA CUENCA AMAZONICA PERUANA UTILIZANDO PRECIPITACIÓN OBTENIDA POR SATELITE* [Universidad Nacional Agraria la Molina].
<https://repositorio.igp.gob.pe/server/api/core/bitstreams/b4a4456e-ded2-4221-bf0d-99665fa5f81b/content>
- Belmonte, S., & Núñez, V. (2006). Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas SIG. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, 6, Article 6.
- Cambalache Cooperativa Geográfica. (s/f). *Introducción al uso de las Imágenes Satelitales*.
https://cambalache.coop.ar/files/Programa_Intro_IMG.pdf
- Cantero, C. (2023, diciembre 22). *Modelos Digitales de Elevación ¿Qué son y para qué sirven?*
<https://www.tierradelfuego.gob.ar/blog/2023/12/22/modelos-digitales-de-elevacion-que-son-y-para-que-sirven/>
- Carrillo Peña, G. A. (2018). *Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido swat*.
<https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/5505>
- Da Silva, D. D. (2015). *Estrategia para el diseño de redes de drenaje pluvial, empleando la modelación matemática, para su aplicación en la ciudad de Luanda* [Instituto Superior

Politécnico José Antonio Echeverría]. <https://blogdelagua.com/wp-content/uploads/2015/05/Tesis-Completa-Ultima.pdf>

Departamento de ingeniería hidráulica, Marítima y Ambiental. (2012). *Manual de utilización del programa HEC-HMS*.

https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250336/2012/40_ManualHMS.pdf

Escalante Sandoval, C. A., & Reyes Chávez, L. (1998). Identificación y análisis de sequías en la Región Hidrológica Número 10, Sinaloa. *Ingeniería hidráulica en México* (1985), 13(2 (mayo-agosto de 1998)), 23–43.

Escenarios Hídricos 2030. (2021, mayo 25). *Cuencas hidrográficas para gestión de recursos hídricos | EH2030*. Escenarios Hídricos 2030. <https://escenarioshidricos.cl/noticia/cuenca-hidrografica-la-unidad-territorial-optima-para-gestionar-recursos-hidricos/>

ESRI. (2002). *¿Qué es ArcGIS?* https://downloads.esri.com/support/whitepapers/ao_/what-is-arcgis-spanish.pdf

ESRI. (2022). *Historia de los SIG | Línea temporal del desarrollo de SIG*. <https://www.esri.com/es-es/what-is-gis/history-of-gis>

ESRI. (2024). *Análisis espacial en ArcGIS Pro*. ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/analysis/introduction/spatial-analysis-in-arcgis-pro.htm>

Estación de meteorología. (2019, febrero 26). *¿QUÉ ES UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA? METEOCULTURA - ESTACIONES METEOROLÓGICAS & METEOROLOGÍA*. <https://estaciondemeteorologia.com/que-es-una-estacion-meteorologica/>

Felícísimo, A. M. (2004). *El Modelo Digital de Elevación*. Universidad de Oviedo. https://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema_2.pdf

- García, C. C. (1996). ÁREAS DE APLICACIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LOS “SIG”. MODELIZACIÓN Y AVANCES RECIENTES. *Papeles de Geografía*, 23–24, Article 23–24.
- García Lorenzo, R., & Conesa García, C. (2011). Estimación de caudales de avenida y delimitación de áreas inundables mediante métodos hidrometeorológicos e hidráulicos y técnicas S.I.G., estudio aplicado al litoral sur de la Región de Murcia | *Papeles de Geografía*. *Papeles de Geografía*, 53–54, 107–123.
- García, S. G., Francés García, F., & Andreu, J. (2002). *Simulación hidrológica basada en SIG: Sensibilidad a factores de escala*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099/2592>
- Gutiérrez Alarcón, M. C. (2022). *Sistema de Información Geográfico QGIS*. UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA. <https://cenida.una.edu.ni/textos/NU40G984.pdf>
- Huerta, F., Sánchez, V., & Estrada, F. (2010). METODOLOGÍA PARA CALCULAR ESCORRENTÍA E INFILTRACIÓN EN CUENCAS. *XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos.*, N° 9, 105–108.
- IRNED. (2005). Estudio de Impacto Ambiental y Social Gasoducto Macueta – Piquirenda. *Empresa Pan American Energy – Universidad Nacional de Salta*.
- Kaless, G., Matamala, F., Monteros, B., & Greco, W. (2008). *CAMBIO HIDROLÓGICO Y MORFOLÓGICO EN EL RÍO CHUBUT AGUAS ABAJO DE LA PRESA FLORENTINO AMEGHINO*. <https://www.repositorio.cenpat-conicet.gob.ar/server/api/core/bitstreams/b2527dc6-62ad-481d-b682-1c03f926b80d/content>
- Lloret, J. R., & Olivella, R. (2017). *Introducción a los sistemas de información geográfica*.

- Lo, C. P., & Yeung, A. K. W. (2002). *Concepts and Techniques of Geographic Information Systems*. Prentice Hall.
- Mendoza, M., Bocco, G., Bravo, M., Siebe, C., & Ortiz, M. A. (2002). Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: Una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas. *Investigaciones geográficas*, 47, 36–58.
- Neteler, M. (2005). *GRASS 6: Una guía de inicio*. GDF Hannover bR. https://neteler.org/wp-content/uploads/neteler/osg05/g63_nutshell_v1_1_es.pdf
- Ordoñez Gálvez, J. J. (2011a). *Balance Hídrico*. Sociedad Geográfica de Lima. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/balance_hidrico.pdf
- Ordoñez Gálvez, J. J. (2011b). *Ciclo Hidrológico*. Sociedad Geográfica de Lima. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf
- Ordoñez Gálvez, J. J. (2011c). *¿Qué es una Cuenca Hidrológica?* Sociedad Geográfica de Lima. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf
- Portuguez M., D. M. (2015). Utilización de los sistemas de información geográfica para la estimación de escorrentía directa. *Canales Científicos*, 76(2), 294–305.
- Reyes, O. A. C. (2013). UTILIZACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CUENCAS EN ECOSISTEMAS DE PÁRAMO. *REVISTA AMBIENTAL AGUA, AIRE Y SUELO*, 4(2), Article 2. <https://doi.org/10.24054/aaas.v4i2.2026>

- Rigaux, P., Scholl, M., & Voisard, A. (2002). *Spatial Databases with Application to GIS. University of Wisconsin*, 31, 440.
- Rodríguez, A., & Gaspari, F. (2014). Herramienta para la determinación del número de curva y escorrentía bajo entorno SIG. Idrisi Andes®. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, 10, Article 10.
- Ruiz, B. (2009). *LOS MAPAS TOPOGRÁFICOS*. Departamento Biología y Geología. IES Santa Clara. <https://biologiageologiaiessantaclarabelenruiz.wordpress.com/wp-content/uploads/2009/12/el-mapa-topogrc3a1fico2.pdf>
- Saavedra, C. P., & Mannaerts, C. (2015, mayo). Evaluación y monitoreo de modelos de erosión y sedimentación a escala regional usando sensores remotos y SIG. Caso de estudio en la región Andina, Cochabamba, Bolivia. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/277021000_saavedra_eva
- Sáenz Saavedra, N. (1992). Los sistemas de información geográfica (SIG) una herramienta poderosa para la toma de decisiones. *Ingeniería e Investigación*, 28, 31–40.
- Salamanca Torres, I. F. (2022). *Generación y modelación de distritos hidráulicos de alcantarillados en Epaswmm a partir de archivos SIG* [Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/9189>
- Scuderi, C. M., Stenta, H. R., Riccardi, G. A., Zimmermann, D., Basile, P. A., & García, M. L. (2008). *Uso de imágenes satelitales y SIG en la generación de mapas de CN y evaluación de la agregación espacial de este parámetro mediante modelación*. https://www.fceia.unr.edu.ar/curiham/es/wp-content/uploads/2018/11/Carlos-Scuderi_MPH-2008_1.pdf

Vásconez, M., Mancheno, A., Álvarez, C., Prehn, C., Cevallos, C., & Ortiz, L. (2019). *Cuencas hidrográficas*. Universidad Politécnica Salesiana.

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19038/1/Cuencas%20hidrográficas.pdf>