LA GEOINFORMÁTICA EN LA GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

LAURA VALENTINA VELASCO QUITIAN

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PREGRADO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C.

2022

LA GEOINFORMÁTICA EN LA GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

LAURA VALENTINA VELASCO QUITIAN

ESTADO DEL ARTE

MODALIDAD PLAN COTERMINAL

DIRIGO POR:

Mag. RONAL JACKSON SIERRA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PREGRADO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C.

2022

LA GEOINFORMÁTICA EN LA GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

El agua es uno de los recursos con mayor importancia para el desarrollo de la sociedad, su uso apoya la economía basada en usos agropecuarios, industriales, sector energético entre otros. Las actividades antropogénicas como la generación de aguas residuales, los efluentes industriales, la agricultura, tienen un papel importante en la contaminación del agua, causando daños a la cuenca hidrográfica y la salud humana. Por lo que se hace prescindible mantener la cuenca y el ecosistema en un nivel saludable (Liu et al., 2020).

La cuenca hidrográfica es entendida como “una parte de la tierra que recibe precipitaciones que fluyen hacia la misma dirección de salida debido a su topografía” (Asgari, 2021) por lo que es posible medir la cantidad de agua disponible de las precipitaciones, la cuenca se ha convertido en una unidad para la gestión del abastecimiento de agua (Asgari, 2021), funcionando como “una unidad básica para el análisis ambiental, ya que permite conocer y evaluar sus diversos componentes y los procesos e interacciones que en ella ocurren” (Braz et al., 2020) siendo objeto de ordenamiento y planificación ambiental y territorial.

Existe una diversidad de aspectos que deben ser tratados en la organización y gestión de una cuenca hidrográfica, como el clima, la geología, geomorfología, hidrología superficial y subterránea, vegetación, fauna, paisaje, socioeconomía, etc., por lo cual es pertinente integrar la geoinformática debido a que es la “rama del conocimiento que se aboca al estudio de la naturaleza y estructura de los datos e información geográfica o espacial, al desarrollo y aplicación de procedimientos, métodos y técnicas para su captura o levantamiento, al almacenamiento, procesamiento, graficación y comunicación de la más diversa información espacial” (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez). Por lo que es importante estudiar el uso de la geoinformática en la gestión de cuencas hidrográficas para la toma de decisiones que influyen a nivel económico, ambiental y social.

LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

En este sentido, es pertinente integrar los sistemas de información geográfica (SIG) que se definen como “un conjunto interactivo de subsistemas orientados hacia la captura y organización de la información georreferenciada, con el fin de suministrar elementos de juicio para apoyar la toma de decisiones" (Sáenz Saavedra, 1992), lo

que ha permitido la evolución de un análisis multidisciplinar así como la planificación, organización y gestión del territorio, donde es esencial la identificación de peligros y riesgos asociados al mismo, por lo cual se han abordado desde diferentes perspectivas para la toma de decisiones respecto a diversas problemáticas actuales.

La gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) es un concepto mundial que busca avanzar en la planificación y gestión adecuadas del agua para garantizar su sostenibilidad y conservación, al tiempo que promueve la generación y el acceso a la información para resolver problemas relacionados con el agua, brindar asistencia e implementar herramientas y recursos que facilitan la toma de decisiones. Balasubramani et al. (2019) realizaron un estudio en el estado de Tamil Nabu (India) con un enfoque espacial multicriterio basado en SIG para la caracterización y priorización de microcuencas, debido a que cada microcuenca cuenta con diferentes características que interfieren en su funcionalidad en relación a la recepción y disposición de agua de la mismas por lo que su priorización es importante en la gestión de cuencas (Javed et al., 2009).

Para la delimitación de las subcuencas usaron el modelo de elevación digital (DEM), considerando las redes de drenaje que fueron usadas para realizar un análisis morfométrico que incluyo aspectos lineales, aéreos y de relieve, dichas redes de drenaje fueron indicadores de topografía y procesos físicos. En cuanto a la estimación de la erosión del suelo, emplearon la ecuación universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE) basada en SIG debido a que brinda información confiable en un corto periodo de tiempo (Balasubramani et al., 2015) mientras que hacer uso de técnicas de campo resultaría un proceso más arduo, con mayor demanda de tiempo y mano de obra. Para la estimación de la escorrentía superficial se empleó el método de numero de curva de los Servicios de Conservación de Recursos Naturales (NRSC-CN) (Rao et al., 2010), esta estimación es un indicador para la evaluación del potencial de rendimiento de agua, la planificación de medidas de conservación y mitigación de peligro de inundación (Patil et al., 2008).

Fue posible evidenciar un enfoque espacial multicriterio basado en SIG utilizando parámetros morfométricos, de erosión del suelo y de escorrentía superficial para la priorización de microcuencas e implementación de medidas de conservación de los recursos. Debido a que la técnica RUSLE presenta una alta efectividad para la evaluación cuantitativa de pérdida de suelo, además, mediante el software GIS se puede visualizar espacialmente las áreas propensas a erosión. Esto permite la

evaluación cuantitativa de la erosión del suelo, la identificación de zonas de riesgo y el diseño de medidas de planificación y gestión del uso del suelo.

Por otro lado, la erosión del suelo, un proceso que ocurre por factores naturales, crecimiento de la población, errores administrativos asociados a su gestión y ordenamiento y actividades en la tierra que aceleran el proceso, provocando afectaciones a nivel económico y ambiental. Gürtekin & Gökçe (2021) realizaron el análisis de riesgo de erosión en un cuerpo de agua de Turquía haciendo uso la ecuación universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE) basado en SIG, ya que la erosión del suelo, un proceso natural que depende de factores naturales y se acelera por factores antropogénicos (Wischmeier et al., 1978), lo cual provoca la degradación del suelo y la tierra (Dutal & Reis, 2020).

El método se realizó asumiendo que la erosión se produce en función de cinco factores principales; “el poder abrasivo de la lluvia, las propiedades físicas del suelo, el estado del uso de la tierra, los estudios de control de la erosión y la topografía” (Gürtekin & Gökçe, 2021), cada uno de los factores del modelo RUSLE se determinó utilizando ArcGIS, encontrando la cantidad de suelo perdido en un año, lo cual se evidenció gráficamente en un mapa de riesgo de erosión, obteniendo un 43% de riesgo de erosión alta y un 57% de riesgo de erosión baja y media.

Otra problemática global es la escasez de agua que presenta un crecimiento a medida que se intensifican las demandas de agua, viéndose afectada la disponibilidad de la misma a escala de cuenca hidrográfica por la presencia de una distribución temporal desigual de la precipitación, producto del cambio climático (Swain et al., 2020). Los impactos del cambio climático sobre el régimen hidrológico influyen directamente al modificar la distribución de la precipitación tanto en tiempo como en espacio (Chim, et al., 2021), el almacenamiento de agua, la evapotranspiración, la escorrentía y el caudal y, por lo tanto, en la producción de agua (Hu, et al., 2005), afectando la disponibilidad de agua en las cuencas hidrográficas. Se prevé que en las próximas décadas casi todos los continentes enfrenten el impacto del estrés hídrico en las fuentes superficiales, por lo que es importante comprender la respuesta del flujo del agua frente al cambio climático (Yuan, et al., 2020).

Noori et al. (2022) realizaron un estudio en Irán, sobre una de las mayores problemáticas que se presenta en las zonas urbanas, la escasez de agua, convirtiéndose en una necesidad tener una gestión sostenible. Aplicaron la integración del SIG con la toma de decisiones con criterios múltiples (MCDM),

específicamente el proceso jerárquico analítico (AHP) que utiliza los aspectos positivos y negativos de los criterios a estudiar (Saaty & Vargas, 2012), para la gestión de prioridades en el suministro de agua.

La integración de la herramienta SIG y el método AHP presentaron un alto potencial en la planificación de la toma de decisiones (Laskar, 2003), debido a la priorización de los criterios, esto con ayuda de capas de datos cuantitativos. Paralelamente, se tuvo en cuenta la opinión de expertos para la evaluación cuantitativa y cualitativa de los criterios mediante matrices de comparación pareadas (PCM). Teniendo como resultado que los criterios que fueron ponderados en el método basado en SIG obtuvieron valores más altos que con la técnica de PCM, esto se presentó por la gran capacidad en el almacenamiento e integración de capas de información.

A nivel mundial, Colombia es el tercer país con mayor cantidad de tierra destinada para agricultura con cultivos de cebolla y papa, entre otros, por lo que hacen uso de pesticidas para controlar las enfermedades foliares generando contaminación y pérdida de la fertilidad del suelo e impactos ambientales al ecosistema. Lo que hace necesario el estudio de los impactos generados por los pesticidas para la toma de decisiones respecto a su uso.

Navarro et al. (2021) realizaron la evaluación del riesgo potencial de lixiviados de plaguicidas en suelos agrícolas en Tibasosa, Boyacá, Colombia debido a que los plaguicidas contrarrestan el ataque de las plagas beneficiando las necesidades de poblaciones con un rápido crecimiento (Wilson & Tisdell, 2001). A pesar de ello, el uso de estos por periodos prolongados causa un deterioro ambiental, así mismo, estos compuestos pueden llegar al agua superficial y subterránea mediante procesos de escorrentía e infiltración, poniendo en riesgo la cadena alimentaria de la población.

El área de estudio fue cultivos de cebolla y papa, de la cual se obtuvo fotografías aéreas y un modelo digital de terreno (MDT), para una mejor visualización del perfil del suelo se construyó un mapa mediante el software ESRI ArcScene que permite ver los datos SIG en tres dimensiones. Adicionalmente, se calculó el factor de atenuación (AF), estima la fracción de pesticida que se filtra en el perfil del suelo, y el factor de retardo (DF), que indica la capacidad de lixiviación de los pesticidas a través del suelo, los cuales determinan el potencial de lixiviación, esta información se presentó en mapas de riesgo, desarrollados en ESRI ArcMap, para cada plaguicida.

Los mapas que se obtuvieron fueron de gran importancia ya que permiten realizar planes de remediación de suelos y agua, además, se observó el comportamiento de los lixiviados de plaguicidas en el perfil de suelo, por lo que se pudo determinar la dinámica de transporte y a su vez la afectación de los acuíferos en el área de estudio (Navarro et al., 2021).

LA TELEDETECCIÓN

Existen dos componentes de suma importancia en la geoinformática, la teledetección, definida como una “técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor, genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información interpretable de la Tierra” (Gobierno de España), y las imágenes satelitales que son el “resultado que se obtiene al capturar la radiación emitida o reflejada por la superficie de la tierra mediante un sensor colocado a bordo de un satélite artificial” (Sánchez, 2012). Por lo que se expondrá su aplicación en diferentes estudios relacionados con el uso y cobertura del suelo, el aprovechamiento del agua subterránea, la importancia de la comprensión del funcionamiento de los sistemas hidrológicas, entre otros, para la toma de decisiones y correcta planificación y gestión de las cuencas hidrográficas.

El uso del suelo y cobertura suelo (LULC) en una cuenca hidrográfica tiene una gran importancia para la conservación del suelo. Shiferaw & Singh (2011) afirmaron que la urbanización induce el cambio de LULC, además, las áreas que las cuencas que influyen en el LULC pueden causar afectación de las propiedades hidrológicas del cuerpo de agua (Chowdhury et al., 2020) por lo que el estudio del cambio del LULC apoya los procesos de planificación y desarrollo moderno (El-Zeiny & Effat, 2017). Abd El-Hamid et al. (2022) evaluaron la dinámica del uso de la tierra y la cobertura del suelo (LULC) y factores ambientales para la simulación del peligro potencial en la cuenca hidrográfica de Guyuan, China utilizando técnicas de observación de datos y SIG.

Para evaluar los riesgos probables procesaron imágenes satelitales y modelos digitales de elevación (DEM) para producir variables ambientales, encontrando que los suelos con poca cubierta vegetal tienen una mayor vulnerabilidad a la erosión, la escorrentía y degradación, además “los análisis DEM mostraron que un mayor grado de segmentación conduce a una mayor degradación y daño de las tierras

agrícola” (Abd El-Hamid et al., 2022) lo cual influye directamente en la seguridad alimentaria. Los resultados del estudio permiten mejorar la gestión del uso y cobertura del suelo para la protección de la cuenca hidrográfica, mediante una mejor formulación de políticas y adecuada planificación de la misma.

Por otro lado, uno de los aspectos de mayor importancia en la gestión de cuencas hidrográficas es el agua subterránea, agua que “se filtra a través de grietas y poros de las rocas y sedimentos que yacen debajo de la superficie de la tierra, acumulándose en las capas arenosas o rocas porosas del subsuelo. El agua se almacena y mueve en las formaciones geológicas que tienen poros o vacíos” (Vélez-Otalvaro, Ortiz-Pimienta, & Vargas-Quintero). Esta constituye un recurso del subsuelo, el cual brinda diferentes oportunidades a la sociedad ya que es una alternativa para el consumo humano, representan aproximadamente el 22% de reservas de agua dulce asequible del planeta.

Saravanan et al. (2021) elaboraron el mapeo del potencial de agua subterránea de una subcuenca del río Arkavathi en India, integrando la teledetección y el SIG ya que es una de las técnicas con mayor eficacia para determinar el potencial de agua subterránea (Das & Pardeshi, 2018). La aplicación de datos obtenidos por teledetección permite comprender factores como la geología, geomorfología, rutas de drenaje, uso y cobertura de la tierra, entre otras (Aggarwal et al., 2019), los cuales influyen el potencial del agua subterránea.

Se empleó el proceso jerárquico analítico (AHP) basado en la toma de decisiones con criterios múltiples (MCDM) junto la teledetección y SIG para la creación de mapas paramétricos y realizar la delineación del mapa del potencial de agua subterránea. Mediante el estudio fue posible evidenciar la integración de la teledetección y el SIG, obteniendo un mapa con una clasificación de cinco zonas, ‘muy buena’ y ‘buena’ para regiones llanas, ‘moderada’ en zonas con alta densidad de drenaje, ‘pobre’ y ‘muy pobre’ para regiones con pendientes pronunciadas (Saravanan et al., 2021), estos resultados permiten propuestas de gestión para un correcto aprovechamiento del agua subterránea, lo que permite un desarrollo sostenible del recurso en la zona.

Para el aprovechamiento del agua subterránea de un territorio es importante tener en cuenta la identificación y delimitación de estas zonas ya que es un elemento esencial para proteger estas fuentes hídricas, siendo necesario realizar una adecuada planificación del uso de los territorios para el aprovechamiento de los recursos. Una adecuada gestión del agua subterránea como recurso de

abastecimiento puede resultar una opción de menor costo económico, ambiental y de salud pública en comparación al abastecimiento basado en aguas superficiales.

Yousif (2019) en la cuenca El-Kubanyia en Egipto, un área piloto remota que podría tener potencial para el desarrollo del futuro, buscó introducir un enfoque basado en datos de teledetección y aplicaciones geoinformaticas junto con investigaciones de campo para la exploración de aguas subterráneas en un área con escasez de datos e identificar los sitios más prometedores para la acumulación de agua subterránea que deberían ser objeto de estudios.

Con la combinación entre trabajos de campo y datos extraídos de aplicaciones SIG y de teledetección, para la interpretación visual de la geología de la superficie, demarcación de accidentes geográficos, análisis de la red de drenaje, la identificación del entorno estructural, entre otros, se emplearon datos derivados de análisis de imágenes satelitales, que junto al DEM, se proyectaron en ArcGis para obtener una mayor correlación. Con ese estudio identificaron 54 posibles sitios para la exploración de agua subterránea mediante investigación hidrogeofísica detallada y perforación de pozos de prueba (Yousif, 2019).

El manejo de cuencas hidrográficas junto con el monitoreo de los recursos hídricos son temas esenciales para la priorización de las mismas, apuntando a un desarrollo sustentable que permita la elección de un adecuado uso del suelo para tener un mejor desarrollo a nivel ambiental, social y económico. Sharma & Mahajan (2020) realizaron un estudio sobre la viabilidad del SIG y datos de teledetección para el análisis de una cuenca del Himalaya.

La metodología implicó el uso de un modelo de elevación digital (DEM) de 30 m para extraer datos para los parámetros morfométricos e hipsométricos, el análisis hipsométrico “es el estudio de la distribución de las áreas de la sección transversal de la superficie del suelo con respecto a sus elevaciones” (Strahler, 1952), lo que condujo a la priorización de las subcuencas en el área de estudio. Los puntos de elevación se extrajeron del respectivo DEM que fueron usados para la evaluación de integrales hipsométricas y trazar curvas hipsométricas, además, junto con las redes de drenaje establecieron diferentes parámetros que ayudaron a comprender aspectos lineales, de relieve y áreas que controlan la morfología de la cuenca (Sharma & Mahajan, 2020).

Concluyendo que la aplicación de SIG junto con los datos de teledetección para estudios morfométricos e hipsométricos son útiles para la delimitación de cuencas

hidrográficas y la priorización de subcuencas, permitiendo realizar un enfoque en conjunto en lugar de un enfoque unitario para cada subcuenca, lo que conlleva a una mejor gestión de las mismas.

Es importante tener claridad sobre las condiciones cambiantes de los sistemas hidrológicos (Blöschl, et al., 2019), debido a que el incremento de las temperaturas y precipitaciones aportan a la descarga de los ríos, lo que conlleva a inundaciones en la época húmeda y sequias de larga duración en la época seca (Oeurng, et al., 2019). Adaptarse a ello es posible mediante los modelos hidrológicos, debido a que permiten una mejor compresión de los sistemas mediante simulaciones que generan una predicción de los sistemas futuros lo que permite la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos (Ruijsch, et al., 2021) para que se dé un adecuado desarrollo socioeconómico y la protección ambiental (Huo & Li, 2013).

Los datos de precipitación, evaporación y temperatura son esenciales para los modelos hidrológicos, siendo necesaria una medición confiable de estos datos para una simulación y predicción precisa del caudal (Camici et al., 2018). Sin embargo, las mediciones limitadas dan como resultado una representación espacial deficiente de estos factores, lo que genera grandes desafíos para el análisis hidroclimático (Faridzad et al., 2018). Los datos obtenidos por satélites comienzan a tener un papel importante debido a que proporcionan datos alternativos para el modelado hidrológico en áreas no aforadas. Por lo que Wang et al. (2022) exploraron la idoneidad y precisión de los datos derivados de satélites basados en las observaciones de medidores para la simulación de caudales en tres cuencas fluviales Hexi, noroeste de China.

El estudio proporcionó “un conocimiento integral sobre la selección de productos basados en satélites para su aplicabilidad hidrológica” (Wang et al., 2022) debido a que evaluaron estadísticamente los productos CHIRPS, CMORPH, GPM, GSMaP, MSWEP y PERSIANN, comparándolos con observaciones de medidores de estaciones meteorológicas, posteriormente realizaron la simulación de flujo impulsada por productos de precipitación basados en satélites (SPP). Identificando las ventajas de unos productos frente a otros como la coherencia con los datos de referencia calibrados, la capacidad de detectar eventos de precipitación, mejor rendimiento para el modelado hidrológico, entre otros.

Brito et al. (2021) evaluaron la eficiencia de la precipitación a largo plazo, que fue estimada por un satélite para monitorear la sequía meteorológica en la cuenca del rio Piranhas en Brasil, con datos de 1994 a 2017 de observaciones de 38

pluviometros, estimación de precipitación de sensores remotos utilizando una red neuronal artificial: registro de datos climáticos (PERSIANN-CDR) y datos de precipitación infrarroja con estación del Grupo de peligros climáticos (CHIRPS) para la evaluación de sequias a corto, mediano y largo plazo.

Los datos de PERSIANN-CDR tuvieron un mejor funcionamiento que los datos de CHIRPS, aunque los resultados mostraron que tanto CHIRPS como PERSIANN-CDR presentaron un desempeño aceptable siendo “complementos valiosos para los datos de lluvia medidos por pluviómetros y que estos conjuntos de datos podrían ser fuentes adicionales para aplicaciones hidrometeorológicas” (Brito et al., 2021).
Elgamal et al. (2017) realizaron una investigación para probar la confiabilidad de mediciones terrestres, productos satelitales de lluvia y su combinación para determinar el impacto en simulaciones de descarga del río Magdalena en Colombia. Usaron dos productos satelitales diferentes de lluvia de la Misión de medición de lluvia tropical (TRMM), los cuales brindaron acceso a datos de precipitación cada 3 horas casi en tiempo real. Los productos de satélites de lluvia mejoran la estimación de la precipitación al llenar los vacíos temporales y espaciales, donde las estaciones de lluvia son escasas.

Los dos productos de lluvia fueron comparados y fusionados con mediciones terrestres, cuantificando su impacto en los caudales mediante el modelo hidrológico distribuido de la Cuenca Elemental Representativa (REW), comparando los resultados en términos de descargas simuladas en dos lugares a lo largo del río Magdalena. Para la simulación hidrológica los productos satelitales empleados no produjeron estimaciones confiables de caudales en la cuenca aguas abajo ya que tienden a conducir a una sobreestimación sistemática de los caudales máximos, indicando que poseen limitaciones para estimar correctamente la lluvia sobre la cuenca, especialmente durante eventos de lluvia intensa (Elgamal et al., 2017).

En Colombia se encuentra la cuenca del rio Magdalena, centro de irradiación hidrográfica y nacimiento del rio Cauca y Magdalena, con una población de aproximadamente 33.6 millones de habitantes (Baez-Villanueva, et al., 2018), convirtiéndola en una de las cuencas de mayor complejidad al tener alta presencia antrópica, lo que está estrechamente relacionado con la intervención cultural y las amenazas ambientales.

Un ejemplo de ello son los ecosistemas de arrecifes de coral, los cuales se encuentran amenazados por las cargas de sedimentos de las descargas de los ríos, estos a su vez están influenciados por los cambios en los patrones de lluvia debido

al cambio climático y por la creciente actividad humana en sus cuencas hidrográficas. Moreno-Madriñán et al. (2015) exploraron la aplicación del uso de sensores remotos para estimar y monitorear la relación de los patrones de lluvia de la cuenca del rio Magdalena en Colombia y la calidad de agua en los arrecifes de coral alrededor de las Islas del Rosario.

A partir de un espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada usaron el producto de reflectancia de la superficie del agua como un indicador de la concentración de sedimentos, el producto de cobertura terrestre para caracterizar la cobertura terrestre de la cuenca y la precipitación se estimó utilizando un producto de la Misión de Medición de la Selva Tropical. Mediante el software ArcGis se extrajo la reflectancia de la superficie del agua en cada uno de los subsitios, a partir de las imágenes seleccionadas, los datos del DEM se procesaron en ArcMap para delimitar la cuenca y poder analizar las relaciones de los procesos en la cuenca y sus desembocaduras.

Se demostró la aplicación exitosa de los productos de sensores remotos para reflectancia de la superficie del agua y la precipitación para identificar y monitorear, temporal y espacialmente la influencia de la lluvia regional y las descargas del río. Aunque no fue posible detectar estadísticamente la influencia en el agua en las islas del Rosario adyacentes la inspección visual de las imágenes satelitales permitió la identificación de intrusión de columnas de sedimentos en el agua, lo que sugiere dicha intrusión (Moreno-Madriñán et al., 2015).

Debido a las limitaciones de las observaciones de precipitación basadas en tierra el uso de los datos meteorológicos provenientes de un satélite ha aumentado, “lo que ha llevado al desarrollo de varios productos de precipitación satelital que abordan las necesidades de varios usuarios” (Elgamal et al., 2017) aportando a la gestión de las cuencas hidrográficas.

Finalmente, de acuerdo a los estudios presentados, es posible establecer que la geoinformacion se convierte en un instrumento fundamental para la gestión de las cuencas hidrográficas debido a que pueden usarse para evaluar las condiciones de las mismas (Wang et al., 2016), además, proporciona diferentes funciones para el almacenamiento, recuperación, análisis e ilustración de datos espaciales, por lo que son usados para desarrollar sistemas de soporte de decisión de las cuencas hidrográficas y encontrar soluciones útiles y eficaces a las problemáticas presentadas (Asgari, 2021).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abd El-Hamid, H. T., Caiyong, W., Yun, Z., & El-Zeiny, A. M. (2022). Environmental hazards of land use/land cover dynamics using data observation techniques and GIS: case study of Guyuan watershed, China. *Arabian Journal of Geosciences*, *15*(5). https://doi.org/10.1007/s12517-022-09655-6

Aggarwal, M., Saravanan, S., Jacinth Jennifer, J., & Abijith, D. (2019). Delineation of groundwater potential zones for hard rock region in karnataka using AHP and GIS. En *Advances in Remote Sensing and Geo Informatics Applications* (pp. 315–317). Springer International Publishing.

Asgari, M. (2021). A critical review on scale concept in GIS-based watershed management studies. *Spatial Information Research*, *29*(3), 417–425. https://doi.org/10.1007/s41324-020-00361-7

Baez-Villanueva, O. M., Zambrano-Bigiarini, M., Ribbe, L., Nauditt, A., Giraldo-Osorio, J. D., & Thinh, N. X. (2018). Temporal and spatial evaluation of satellite rainfall estimates over different regions in Latin-America. *Atmospheric Research*, 213, 34–50. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.05.011

Balasubramani, K., Gomathi, M., Bhaskaran, G., & Kumaraswamy, K. (2019). GIS-based spatial multi-criteria approach for characterization and prioritization of micro-watersheds: a case study of semi-arid watershed, South India. *Applied Geomatics*, *11*(3), 289–307. https://doi.org/10.1007/s12518-019-00261-y

Balasubramani, K., Veena, M., Kumaraswamy, K., & Saravanabavan, V. (2015). Estimation of soil erosion in a semi-arid watershed of Tamil Nadu (India) using revised universal soil loss equation (RUSLE) model through GIS. *Modeling Earth Systems and Environment*, *1*(3). https://doi.org/10.1007/s40808-015-0015-4

Blöschl, G., Bierkens, M. F. P., Chambel, A., Cudennec, C., Destouni, G., Fiori, A., Kirchner, J. W., McDonnell, J. J., Savenije, H. H. G., Sivapalan, M., Stumpp, C., Toth, E., Volpi, E., Carr, G., Lupton, C., Salinas, J., Széles, B., Viglione, A., Aksoy, H., … Zhang, Y. (2019). Twenty-three unsolved problems in

hydrology (UPH) – a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 64(10), 1141–1158. https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507

Brito, C. S. de, Silva, R. M. da, Santos, C. A. G., Brasil Neto, R. M., & Coelho, V. H. R. (2021). Monitoring meteorological drought in a semiarid region using two long-term satellite-estimated rainfall datasets: A case study of the Piranhas River basin, northeastern Brazil. *Atmospheric Research*, 250. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105380

Braz, A. M., Garcia, P. H. M., Pinto, A. L., Chávez, E. S., & Oliveira, I. J. de. (2020). Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra. *Cuadernos de Geografía Revista Colombiana de Geografía*, *29*(1), 69–85. https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.76232

Camici, S., Ciabatta, L., Massari, C., & Brocca, L. (2018). How reliable are satellite precipitation estimates for driving hydrological models: A verification study over the Mediterranean area. *Journal of Hydrology*, 563, 950–961. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.067

Chim, K., Tunnicliffe, J., Shamseldin, A. Y., & Bun, H. (2021). Assessment of land use and climate change effects on hydrology in the upper Siem Reap River and Angkor Temple Complex, Cambodia. *Environmental Development,* 39. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2021.100615

Chowdhury, M., Hasan, M. E., & Abdullah-Al-Mamun, M. M. (2020). Land use/land cover change assessment of Halda watershed using remote sensing and GIS. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, *23*(1), 63–75. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.11.003

Das, S., & Pardeshi, S. D. (2018). Integration of different influencing factors in GIS to delineate groundwater potential areas using IF and FR techniques: a study of Pravara basin, Maharashtra, India. *Applied Water Science*, *8*(7). https://doi.org/10.1007/s13201-018-0848-x

Dutal, H., & Reis, M. (2020). Determining the effects of land use on soil erodibility in the Mediterranean highland regions of Turkey: a case study of the Korsulu stream watershed. *Environmental Monitoring and Assessment*, *192*(3), 192. https://doi.org/10.1007/s10661-020-8155-z

Elgamal, A., Reggiani, P., & Jonoski, A. (2017). Impact analysis of satellite rainfall products on flow simulations in the Magdalena River Basin, Colombia. *Journal of hydrology. Regional studies*, 9, 85–103. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.09.001

El-Zeiny, A. M., & Effat, H. A. (2017). Environmental monitoring of spatiotemporal change in land use/land cover and its impact on land surface temperature in El-Fayoum governorate, Egypt. *Remote Sensing Applications Society and Environment*, *8*, 266–277. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.10.003

Eniyew, S., Teshome, M., Sisay, E., & Bezabih, T. (2021). Integrating RUSLE model with remote sensing and GIS for evaluation soil erosion in Telkwonz Watershed, Northwestern Ethiopia. *Remote Sensing Applications Society and Environment*, *24*. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100623

Faridzad, M., Yang, T., Hsu, K., Sorooshian, S., & Xiao, C. (2018). Rainfall frequency analysis for ungauged regions using remotely sensed precipitation information. *Journal of Hydrology,* 563, 123–142. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.071

Gobierno de España. (s.f). Teledetección. Obtenido de Instituto Geográfico Nacional: https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf#:~:text=La%20teledetecci%C3%B3n%20es%20la%20t%C3%A9cnica,informaci%C3%B3n%20interpretable%20de%20la%20Tierra.

Gürtekin, E., & Gökçe, O. (2021). Estimation of erosion risk of Harebakayiş sub-watershed, Elazig, Turkey, using GIS based RUSLE model. *Environmental Challenges*, *5*. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100315

Hu, Q., Willson, G. D., Chen, X., & Akyuz, A. (2005). Effects of climate and landcover change on stream discharge in the Ozark Highlands, USA. *Environmental Modeling and Assessment*, *10*(1), 9–19. https://doi.org/10.1007/s10666-004-4266-0

Huo, A., & Li, H. (2013). Assessment of climate change impact on the stream-flow in a typical debris flow watershed of Jianzhuangcuan catchment in Shaanxi Province, China. *Environmental Earth Sciences*, *69*(6), 1931–1938. https://doi.org/10.1007/s12665-012-2025-0

Jaiswal, R. K., Ghosh, N. C., Galkate, R. V., & Thomas, T. (2015). Multi criteria decision analysis (MCDA) for watershed prioritization. *Aquatic procedia*, *4*, 1553–1560. https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.201

Javed, A., Khanday, M. Y., & Ahmed, R. (2009). Prioritization of sub-watersheds based on morphometric and land use analysis using remote sensing and GIS techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *37*(2), 261–274. https://doi.org/10.1007/s12524-009-0016-8

Kulkarni, A. T., Mohanty, J., Eldho, T. I., Rao, E. P., & Mohan, B. K. (2014). A web GIS based integrated flood assessment modeling tool for coastal urban watersheds. *Computers & Geosciences*, *64*, 7–14. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.11.002

Liu, B.-W., Wang, M.-H., Chen, T.-L., Tseng, P.-C., Sun, Y., Chiang, A., & Chiang, P.-C. (2020). Establishment and implementation of green infrastructure practice for healthy watershed management: Challenges and perspectives. *Water-Energy Nexus*, *3*, 186–197. https://doi.org/10.1016/j.wen.2020.05.003

Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2003). *Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology* (2003a ed.). Springer.

Moreno-Madriñán, M. J., Rickman, D. L., Ogashawara, I., Irwin, D. E., Ye, J., & Al-Hamdan, M. Z. (2015). Using remote sensing to monitor the influence of river discharge on watershed outlets and adjacent coral Reefs: Magdalena River and Rosario Islands, Colombia. *ITC journal*, 38, 204–215. https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.01.008

Navarro, L., Camacho, R., López, J. E., & Saldarriaga, J. F. (2021). Assessment of the potential risk of leaching pesticides in agricultural soils: study case Tibasosa, Boyacá, Colombia. *Heliyon,* 7(11). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08301

Noori, A., Bonakdari, H., Hassaninia, M., Morovati, K., Khorshidi, I., Noori, A., & Gharabaghi, B. (2022). A reliable GIS-based FAHP-FTOPSIS model to prioritize urban water supply management scenarios: A case study in semi-arid climate. *Sustainable Cities and Society*, *81*. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103846

Oeurng, C., Cochrane, T., Chung, S., Kondolf, M., Piman, T., & Arias, M. (2019). Assessing climate change impacts on river flows in the Tonle Sap Lake basin, Cambodia. *Water*, *11*(3), 618. https://doi.org/10.3390/w11030618

Patil, J. P., Sarangi, A., Singh, A. K., & Ahmad, T. (2008). Evaluation of modified CN methods for watershed runoff estimation using a GIS-based interface. *Biosystems Engineering*, *100*(1), 137–146. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.02.001

Rao, K. N., Narendra, K., & Latha, P. S. (2010). An integrated study of geospatial information technologies for surface runoff estimation in an agricultural watershed, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *38*(2), 255–267. https://doi.org/10.1007/s12524-010-0032-8

Rodrigues, M. V. C., Guimarães, D. V., Galvão, R. B., Patrick, E., & Fernandes, F. (2022). Urban watershed management prioritization using the rapid impact assessment matrix (RIAM-UWMAP), GIS and field survey. *Environmental Impact Assessment Review*, *94*. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106759

Ruijsch, J., Verstegen, J. A., Sutanudjaja, E. H., & Karssenberg, D. (2021). Systemic change in the Rhine-Meuse basin: Quantifying and explaining parameters trends in the PCR-GLOBWB global hydrological model. *Advances in Water Resources*, *155*. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.104013

Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). The seven pillars of the analytic hierarchy process. En *International Series in Operations Research & Management Science* (pp. 23–40). Springer US.

Sáenz Saavedra, N. (1992). Los sistemas de información geográfica (SIG) una herramienta poderosa para la toma de decisiones. *Ingeniería e Investigación*, *28*, 31–40. https://doi.org/10.15446/ing.investig.n28.20790

Sánchez, P. (2012). La teledetección enfocada a la obtención de mapas digitales. Universidad de Cuenca, Cuenca.

Saravanan, S., Saranya, T., Abijith, D., Jacinth, J. J., & Singh, L. (2021). Delineation of groundwater potential zones for Arkavathi sub-watershed, Karnataka, India using remote sensing and GIS. *Environmental Challenges*, *5*. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100380

Sharma, S., & Mahajan, A. K. (2020). GIS-based sub-watershed prioritization through morphometric analysis in the outer Himalayan region of India. *Applied Water Science*, *10*(7). https://doi.org/10.1007/s13201-020-01243-x

Shiferaw, A., & Singh, K. L. (2011). Evaluating the land use and land cover dynamics in Borena Woreda South Wollo Highlands, Ethiopia. The *Ethiopian Journal of Business and Economics*, *2*(1). https://doi.org/10.4314/ejbe.v2i1

Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, *7*(4), 270–292. https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2002)7:4(270)

Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America bulletin*, *63*(11)

Swain, S. S., Mishra, A., Sahoo, B., & Chatterjee, C. (2020). Water scarcity-risk assessment in data-scarce river basins under decadal climate change using a hydrological modelling approach. *Journal of Hydrology*, *590*. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125260

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. (s.f.). Geoinformática. Obtenido de Universidad Autónoma de Ciudad Juárez: http://www3.uacj.mx/SC/Paginas/La-Geoinform%C3%A1tica-es.aspx#:~:text=La%20Geoinform%C3%A1tica%2C%20si%20se%20prefiere,su%20captura%20o%20levantamiento%2C%20al

Vélez-Otálvaro, M., Ortiz-Pimienta, C., & Vargas-Quintero, M. (s.f.). *Las aguas subterráneas - Un enfoque práctico*. Instituto Colombiano de Geología y Minería.

Wang, C., Si, J., Zhao, C., Jia, B., Celestin, S., Li, D., He, X., Zhou, D., Qin, J., & Zhu, X. (2022). Adequacy of satellite derived data for streamflow simulation in three Hexi inland river basins, Northwest China. *Atmospheric Research*, *274*. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106203

Wang, G., Mang, S., Cai, H., Liu, S., Zhang, Z., Wang, L., & Innes, J. L. (2016). Integrated watershed management: evolution, development and emerging trends. *Journal of Forestry Research*, *27*(5), 967–994. https://doi.org/10.1007/s11676-016-0293-3

Wilson, C., & Tisdell, C. (2001). Why farmers continue to use pesticides despite environmental, health and sustainability costs. *Ecological Economics: The Journal of the International Society for Ecological Economics,* 39(3), 449–462. https://doi.org/10.1016/s0921-8009(01)00238-5

Wischmeier, W. H., Smith, D. D., United States. Science and Education Administration, & Purdue University. Agricultural Experiment Station. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Department of Agriculture, Science and Education Administration.

Yousif, M. (2019). Hydrogeological inferences from remote sensing data and geoinformatic applications to assess the groundwater conditions: El-Kubanyia basin, Western Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences* (Oxford, England: 1994), 152, 197–214. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.02.003

Yuan, S., Quiring, S. M., Kalcic, M. M., Apostel, A. M., Evenson, G. R., & Kujawa, H. A. (2020). Optimizing climate model selection for hydrological modeling: A case study in the Maumee River basin using the SWAT. *Journal of Hydrology*, *588*. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125064