

Revisión sistemática sobre geolocalización automática para pequeñas centrales hidroeléctricas

Systematic review of automatic geolocation for small hydropower plants

Luis Eduardo Ordoñez Palacios , Víctor Andrés Bucheli Guerrero 
Universidad del Valle, Colombia
Hugo Ordoñez Erazo 
Universidad del Cauca, Colombia

Open Access

Recibido:

13 de diciembre de 2019

Aceptado:

16 de enero de 2020

Publicado:

21 abril de 2020

Correspondencia:

hugoordonez@unicauca.edu.co

DOI:

<https://doi.org/10.17081/invinno.8.1.3779>



© Copyright: Investigación e
Innovación en Ingenierías

Resumen

Objetivo: Identificar tecnologías computacionales que se están utilizando en la identificación y selección automática de sitios para pequeñas centrales hidroeléctricas. **Metodología:** Se realizaron búsquedas sistemáticas de artículos científicos, artículos de conferencias, revistas indexadas y libros de ingeniería, en bases de datos de referencias bibliográficas, lo que permitió, una revisión exploratoria y analítica para la recopilación de información significativa, sobre las tecnologías utilizadas en la ubicación automática de este tipo de proyectos. **Resultados:** Esta revisión permitió establecer que el Big Data para el análisis de datos geoespaciales, los algoritmos de agrupamiento, las metodologías de toma de decisiones con múltiples criterios y el análisis visual de datos, están directamente involucrados en la ubicación automática de pequeñas centrales hidroeléctricas. **Conclusiones:** En Latinoamérica se pueden encontrar algunas investigaciones alrededor de la selección automática de sitios para pequeñas centrales hidroeléctricas, sin embargo, Colombia aún no ha publicado estudios de este tipo en las principales revistas científicas y bases de datos de referencias bibliográficas, asimismo, menos del 10% de los artículos examinados en esta investigación, se han realizado en esta región del continente.

Palabras claves: Big Data, energías limpias, geolocalización, SIG, hidroeléctrica, selección de sitios.

Abstract

Objective: Identify computational technologies that are being used in the automatic identification and selection of sites for small hydroelectric power plants. **Methodology:** Systematic searches of scientific articles, conference papers, indexed journals, and engineering books in databases of bibliographic references were conducted, allowing an exploratory and analytical review for the collection of significant information about the technologies used in the automatic location of this type of projects. **Results:** This review established that the Big Data for geospatial data analysis, grouping algorithms, multi-criteria decision-making methodologies, and visual analysis of data are directly involved in the automatic location of small hydropower plants. **Conclusions:** In Latin America, some research can be found on the automatic site selection for small hydropower plants. However, Colombia has not yet published studies of this type in main scientific journals and databases of bibliographic references. Similarly, less than 10% of the papers examined in this research have been written in this region of the continent.

Keywords: Big Data, clean energy, geolocation, GIS, hydropower, site selection.

Como citar (IEEE): L.E. Ordoñez Palacios, V.A. Bucheli Guerrero., y H. Ordoñez Erazo, "Revisión sistemática sobre geolocalización automática para pequeñas centrales hidroeléctricas", Investigación e Innovación en Ingenierías, vol. 8, n°. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.8.1.3779>

Introducción

En los últimos años, el interés por las energías renovables se ha incrementado, debido a la creciente preocupación por la contaminación, el agotamiento de los recursos y las posibles implicaciones del cambio climático por el uso continuo de combustibles fósiles, además, los nuevos desarrollos tecnológicos han mejorado la rentabilidad de muchas de las energías limpias y amigables con el ambiente, como es el caso de la energía eólica, geotérmica, hidroeléctrica, solar, etc., [1].

Algunas regiones con abundantes fuentes hídricas y altas precipitaciones, están considerando la producción de energía hidroeléctrica como una alternativa sostenible, sin embargo, la construcción de este tipo de estaciones a gran escala tiene diversas restricciones ambientales, sociales y económicas que pueden restringir su implementación [2, 3], por ende, los gobiernos y los investigadores se están enfocando en pequeñas centrales hidroeléctricas, no solo por su bajo impacto en el ambiente, sino también por su bajo costo [4, 5], además, porque posibilitan llevar el servicio eléctrico a las comunidades más remotas de las distintas regiones alrededor del planeta, proporcionándoles beneficios sociales y económicos [6].

La utilización de pequeñas centrales hidroeléctricas como fuente de suministro de energía en áreas remotas, es una de las iniciativas de investigación más atractivas en varios países y/o regiones, como: África Subsahariana, Uganda, Brasil, Canadá, Estados Unidos, Corea, India, Indonesia, Irán, Nepal, Pakistán, Tailandia, Turquía, Irlanda y Suiza, por mencionar solo algunos. Muchas de estas naciones y otras más, han procurado construir herramientas de software para evaluar sus capacidades hidroeléctricas y para identificar de forma automática, los sitios potenciales para la instalación de pequeñas centrales hidroeléctricas, tratando de evitar la intervención humana y otros criterios que requieren del uso de recursos económicos adicionales, teniendo como base la información geoespacial de sus cuencas hidrográficas.

En Colombia, aun se padece del problema de cobertura en el acceso al servicio de energía eléctrica, sobre todo, en la población rural más alejada geográficamente de las líneas de transmisión principales, según [7], la clasificación para cada uno de los municipios en Colombia, con información del año 2014, se calcula que 373 municipios y áreas no municipales pertenecen a la categoría de “rural” con una población de 5.402.735 de habitantes y 318 a “rural disperso” con una población de 3.658.702 de habitantes, además, teniendo en cuenta el Mapa de acceso a servicios públicos del DANE [8], se puede apreciar que el porcentaje de acceso al servicio de Energía Eléctrica en centros poblados y rural disperso por departamentos, solo alrededor del 44% de los departamentos del país,

cuentan con un porcentaje de acceso al servicio por encima del 90%, al mismo tiempo, departamentos como: Amazonas, Caquetá, Chocó, Guainía, Guaviare, La guajira, Putumayo, Vaupés y Vichada refieren un porcentaje de acceso al servicio de electricidad inferior al 60%; son numerosas las regiones en donde se vive esta situación, aun cuando cuentan con abundantes recursos hídricos y altos índices de precipitaciones como se observa en el Atlas Interactivo Climatológico del IDEAM [9], destacando los departamentos de Amazonas, Caquetá, Choco, Guainía, Guaviare, Putumayo, Vaupés y Vichada con un promedio de entre 2.500 y 9.000 mm de lluvia anual; ésta es una problemática no resuelta, que puede ser abordada desde la ingeniería de sistemas y la computación, mediante un sistema inteligente, que permita la evaluación del potencial hidroeléctrico y la selección de los sitios más probables para la construcción de pequeñas estaciones que contribuyan con una propuesta de cambio en la forma en cómo se accede a este servicio, direccionado a las regiones en el camino de la generación de energía limpia y sostenible, siempre y cuando, existan políticas de inversión en entidades privadas y/o gubernamentales.

Es importante resaltar que el insumo de entrada para un sistema inteligente corresponde a grandes volúmenes de datos estructurados, semiestructurados y/o no estructurados, provenientes de sensores remotos, datos geoespaciales, redes de información, flujos de datos, la web, entre otros, que deberán ser procesados y analizados para la visualización de los resultados [10]. En los últimos años se han producido investigaciones que podrían ayudar en este proceso y como ejemplos, el documento [11] propone un lenguaje de consulta para permitir el procesamiento de consultas espacio-temporales en flujos de datos semánticos generados a partir de diversos sensores; la referencia en [12], utiliza un estudio de caso de datos de ciudades para resolver el problema heterogéneo en diferentes fuentes mejorando la agregación, integración y representación de los datos; el estudio en [13], realiza un análisis crítico de las herramientas para visualización de información a partir de grandes volúmenes de datos geoespaciales.

La aplicación de Big data para el análisis de datos geoespaciales, proporciona herramientas y métodos para interpretar datos y plantear soluciones a problemas ubicados en diferentes contextos [10, 12, 14], por su parte, el análisis visual de datos generados a partir de flujos de datos proporcionados por múltiples sensores, conlleva a la producción de conocimiento [15, 16] [17], asimismo, los algoritmos de agrupación permiten explorar conjuntos de datos para obtener resultados más precisos [18, 19], por último, es clave comprender que, en muchos casos, las investigaciones direccionan la solución de un problema por medio del análisis de toma de decisiones [20, 21, 22, 23, 24, 25, 26].

El presente artículo, se compone de cinco secciones. En primer lugar, se presenta la Introducción, seguido por el estado del arte y la metodología, en donde se describe en detalle: las preguntas de investigación, las fuentes de información, las cadenas de búsqueda, los criterios de selección y el análisis de información. Posteriormente esta la Discusión y trabajo futuro y finalmente, las conclusiones.

Estado del arte

En este apartado, se presenta los principales resultados obtenidos en las investigaciones clasificadas por país o por región, posteriormente, identifica y clasifica las tecnologías computacionales utilizadas en la selección de sitios para pequeñas centrales hidroeléctricas, en las cuales se revisan las herramientas y modelos empleados en la solución del problema, de acuerdo con el Sistema de Clasificación de Computación de ACM.

Resultados obtenidos de investigaciones por país o región

La Figura 1 muestra una clasificación de los trabajos realizados en diferentes regiones del mundo seguido de los resultados de interés obtenidos.

Figura 1. Clasificación de trabajos realizados en diferentes regiones del mundo



Fuente: API GeoChart de Google [27]

En Norteamérica, Canadá, utilizó RHAM en 2007, para evaluar el potencial hidroeléctrico de un río en la Provincia de Columbia Británica, allí se identificaron más de 8.000 oportunidades [28] para la instalación de pequeñas centrales hidroeléctricas; por su parte, Estados Unidos, según la investigación en [29], está evaluando la idoneidad de los sitios hidroeléctricos mediante el análisis de proximidad SIG. Centroamérica ya ha iniciado estudios para determinar el potencial hidroenergético a pequeña escala, como es el caso de México, según la investigación en [30], además, en Suramérica, países como Brasil ha venido adelantado investigaciones de este tipo como lo demuestran, las referencias en [20, 31, 32, 33], que están relacionadas con el análisis de modelos hidrológicos y la aplicación de sistemas de información geográfica, teniendo en cuenta restricciones socioambientales, con el objetivo de determinar el potencial energía

hidroeléctrica y mejorar la planificación de pequeñas centrales hidroeléctricas.

Europa también ha desarrollado investigaciones de este tipo; en Irlanda, el objetivo del trabajo en [34], es desarrollar un programa de computadora que explore un terreno e identifique si hay sitios para estaciones de energía hidroeléctrica bombeada factibles en él, de igual manera, Suiza, mediante la investigación en [35], ha desarrollado e integrado una metodología, en una herramienta informática incorporada en el software ArcGIS 9.2, esta herramienta se basa en un modelo de elevación digital (DEM) y datos de escorrentía, además, calcula las características de cada proyecto potencial, seleccionando la mejor, de acuerdo con criterios establecidos previamente. Turquía es otro ejemplo en el cual, mediante el estudio en [36], se logró determinar 85 posibles ubicaciones que permiten diferentes niveles de producción anual de energía, los resultados obtenidos son muy importantes para su planificación regional. De igual manera, Italia, encontró en [37], que la alta sensibilidad al precio de la energía y la tasa de interés de las pequeñas centrales hidroeléctricas, entre otras razones, que los valles de Gesso y Vermenagna en los Alpes no sean atractivos para la realización de nuevas centrales hidroeléctricas; en [38], se realizó un estudio sobre la cuenca de Arroscia, donde se examinaron 27 secciones de vertederos, lo que resultó en 640 alternativas de mini centrales hidroeléctricas evaluadas.

En el subcontinente africano, la investigación en [39] logró identificar 15,599 sitios potenciales, lo que se suma a un potencial técnico total de 25,221 MW, asimismo, en Uganda [40], se identificaron 250 sitios potenciales para plantas hidroeléctricas de pequeña escala, se evaluaron 14 de ellos y finalmente, solo 3 sitios cumplieron con los criterios establecidos previamente.

En Asia, el estudio en [41], se aplicó una nueva metodología desarrollada en la parte superior de la cuenca del río Geum, en Corea del Sur, y encontró seis sitios potenciales de pequeñas centrales hidroeléctricas. La India es uno de los países que más ha trabajado en el tema de la ubicación de hidroeléctricas a pequeña escala, entre sus estudios se encuentran: Los algoritmos de lógica difusa y bat [18], pudieron identificar la ubicación más adecuada, pero cuando se tomó en cuenta el tiempo, se encontró que el primero tenía un mejor rendimiento que el segundo; [42] demuestra un enfoque computacional sistemático e integral, para extraer información para la identificación y evaluación de los recursos hídricos; En [43], se intentó utilizar SIG y detección remota para llegar a varios sitios alternativos disponibles en el área de estudio y, finalmente, seleccionar el sitio más adecuado desde el punto de vista técnico; en [44], se identificaron 9 arroyos con un potencial teórico de aproximadamente 133 MW, disponibles en 107 sitios en la cuenca hidrográfica de Umkhen de 1204 km²; El estudio en [19], fue aplicado en los sitios Ashti y Hiwra, en India, y los valores obtenidos

mediante la técnica K-Means se comparan con el método convencional, obteniendo resultados muy similares.

Otros países asiáticos como Indonesia, demostraron en [45], que el área objeto de estudio tiene 18 sitios potenciales entre 100 kW y 5.2 MW. En Irán, los resultados de [46] son importantes para la planificación regional de la cuenca Tabriz, en colaboración con los tomadores de decisiones, igualmente, en el estudio preliminar en [47], se identificaron 75 lugares posibles, de los cuales, finalmente, se seleccionaron 5 ubicaciones para el diseño e instalación, asimismo, en [48], sugiere cuatro alternativas para la ubicación de la planta hidroeléctrica en la cuenca Sefidbarg considerando criterios de ingeniería. Nepal, por su parte, en la referencia en [21], identificaron 6 sitios piloto, con capacidad comparable para probar el marco de decisión. También Pakistán, según la referencia [22], reveló 36 sitios óptimos en el primer enfoque, mientras que el segundo encontró 26, pero ambos definieron el mismo potencial hidroeléctrico de 235 MW, además en [49], se utilizó SIG y modelos de elevación digital para estimar el potencial del río Khunar en la generación de energía hidroeléctrica. El país filipino, según la investigación en [26], demostró que los métodos de toma de decisiones multicriterio en el análisis de datos geoespaciales permite la ubicación óptima de sitios para hidroeléctricas a pequeña escala. Por último, Tailandia, en [23] pudo establecer que existen 70 áreas potenciales, donde se podría instalar un generador de energía hidroeléctrica de más de 5 kW y los resultados en [24], indican que los sitios factibles, se encuentran en 39 arroyos en 10 distritos de la provincia de Nan, en los cuales, hay 86 sitios que son posibles.

Tecnologías computacionales para la selección de sitios

La clasificación de las tecnologías computacionales utilizadas en esta investigación, está basada en la categorización de los artículos a partir del Sistema de Clasificación de Computación de ACM. Esta sección responde a la pregunta: ¿Qué tecnologías se han aplicado en la selección automática de sitios?

La arquitectura Big Data y el análisis de datos geoespaciales permite la identificación y ubicación de sitios potenciales mediante datos cartográficos para facilitar el tratamiento de grandes volúmenes de datos con información de posicionamiento, entre las aplicaciones de esta tecnología está el procesamiento de información geoespacial en función de su importancia para la toma de decisiones.

El Análisis visual de datos posibilita la obtención de conocimiento a partir de las observaciones subyacentes, lo que permite la producción de conocimiento a partir de visualizaciones derivadas de los datos, conllevando al estudio de las observaciones de datos mediante gráficos, tablas, mapas, infografías y tableros interactivos.

El Clustering facilita la identificación de sitios mediante el agrupamiento de datos a partir de la Minería de datos exploratoria para el procesamiento de datos mediante reconocimiento de patrones, se utiliza como métodos de identificación y clasificación en Biología, Medicina, Marketing y por supuesto, en la Ingeniería, entre otros.

La Toma de decisiones con múltiples criterios proporciona herramientas para el análisis de criterios técnicos, topográficos económicos, sociales, ambientales para la selección de sitios, lo que podría conducir a la elección de los sitios más apropiados, según el juicio y la opinión de expertos, facilitando la toma de decisiones como factor importante en la fiabilidad de la selección, entre sus aplicaciones se encuentran, la evaluación multicriterio mediante la investigación de operaciones y las técnicas de Suma Ponderada (Scoring), Análisis Jerárquico AHP, Utilidad Multiatributo UMA, Proceso Analítico de Red.

Big Data y análisis de datos geoespaciales

El análisis de datos geoespaciales proporciona herramientas y métodos para interpretar grandes volúmenes de datos y plantear soluciones a problemas ubicados en diferentes contextos, que van desde el ámbito gubernamental, de telecomunicaciones, comercial, meteorológico, de planificación urbana hasta la producción de energía a través de fuentes limpias. En esta sección se responde a las preguntas: ¿Cómo analizar conjuntos de datos no estructurados provenientes de fuentes heterogéneas?, ¿Cuáles investigaciones emplean sistemas de información geográfica en la evaluación de la capacidad hidroeléctrica de una región?, ¿Cuáles herramientas y modelos se utilizan en el contexto de las pequeñas hidroeléctricas?

Tecnologías de la web semántica

En [12], se utilizan tecnologías de la web semántica para el análisis de conjuntos de datos y para darles significado a datos no estructurados, con el principal objetivo de resolver el problema heterogéneo en las diferentes fuentes de datos, gracias a la contribución de la investigación en la mejora de la agregación, integración y representación de los datos geoespaciales de forma semántica, mediante el formato RDF que se usa para integrar y construir el modelo de Big Data para el almacenamiento de los datos.

Big Data y análisis de datos geoespaciales

En la revisión se encontraron trabajos que describen la arquitectura Big Data y presentan el desarrollo de una capa de gestión para el análisis de datos geoespaciales. En [10], se posibilita la gestión y el monitoreo continuo de los recursos naturales, demostrando que, mediante la potenciación de la arquitectura Big data, el flujo voluminoso y continuo de datos geoespaciales

no clasificados se puede almacenar, extraer, analizar y visualizar fácilmente, el estudio en [14], muestra una arquitectura que proporciona una forma rápida de inserción de información a través de diferentes cargadores de datos, almacenamiento basado en tablas y matrices, y un conjunto de interfaces para una exploración dinámica y detallada de los datos.

Sistemas de información geográfica para la evaluación del potencial hídrico

El estudio en [39], se centra en la evaluación técnica de la energía producida por pequeñas centrales hidroeléctricas en el África subsahariana, basados en conjuntos de datos geoespaciales y acorde con restricciones sociales y ambientales; En [26, 29, 30, 33, 36, 37, 38, 40, 43, 45, 46, 47, 48, 49] se utilizan los sistemas de información geográfica para evaluar el potencial hidroeléctrico teórico, considerando diferentes factores y parámetros, en regiones, como: el área remota de Rogongon, ciudad de Iligan en Filipinas, el suroeste de Uganda, México, Brasil, Estados Unidos, Italia, el Himalaya en la India, Kapuas Hulu en Indonesia, Tabriz en Irán, Bilecik en Turquía y Pakistán. El estudio en [41], propone una nueva metodología de análisis con la intención de encontrar sitios para pequeñas centrales hidroeléctricas utilizando sistemas de información geoespaciales (GIS), aplicándola en la cuenca del río Geum, en Corea del Sur.

Herramientas software y modelos basados en sistemas de información geográfica

En [50], se presenta una evaluación de las herramientas de software basadas SIG en el contexto de las pequeñas centrales hidroeléctricas, entre las que se encuentran: ArcGIS 9.2 Spatial Analyst, el modelo rápido de evaluación de energía hidroeléctrica (RHAM), el atlas SMART Web-GIS y el Prospector de Hidroelectricidad Virtual (VHP). Los trabajos en [28, 31, 32, 35, 44] utilizaron la metodología Hydrosport y técnicas de geotecnología mediante scripts de python, PLpgSQL y R en cuencas de Brasil, el modelo RHAM para evaluar el potencial hidroeléctrico de un río en Columbia Británica en Canadá, el modelo hidrológico SWAT2000 en la cuenca del río Kopili en Assam (India) y también, se desarrolló y se aplicó una metodología incorporada en el software ArcGIS 9.2, basada en un modelo de elevación digital (DEM) y datos de escorrentía en el cantón de Vaud, Suiza.

Análisis visual de datos

A cada momento se están produciendo enormes cantidades de datos a grandes velocidades, lo que indica que puede ser abrumador tratar de comprenderlos, por ello existen las técnicas de análisis y visualización de datos, estas herramientas presentan los datos de una manera más fácil de entender. Una solución de análisis de datos visuales, tiene una interfaz que puede ser un tablero interactivo en una pantalla, para que los usuarios seleccionen las fuentes de datos y las opciones para mostrarlos. Las opciones

de visualización de datos pueden variar desde líneas básicas, barras y gráficos circulares, hasta indicadores más sofisticados como gráficos de dispersión y mapas de árboles. Esta sección resuelve los interrogantes: ¿El análisis visual de datos brinda la posibilidad de obtener conocimiento a partir de observaciones?, ¿Cuáles herramientas se emplean en el análisis visual de datos?,

Definición, procesamiento y desafíos del análisis visual de datos

Los investigadores y usuarios de la visualización de información, están convencidos de que tiene valor y se puede comunicar fácilmente a otros, de manera que este valor se experimente en la práctica. Sin embargo, es más difícil convencer a un público más amplio, y también, comprender las cualidades intrínsecas de la visualización. En [15], se considera la visualización de la información desde diferentes puntos de vista y se recopilan argumentos para explicar su valor. El estudio en [16], propone una definición, la forma de procesamiento y los desafíos que conllevan el análisis visual de datos. El artículo [17], presenta una revisión del estado de la técnica en analítica visual de datos geoespaciales y propone un marco que consta del modelo de datos, el modelo de usuario, el modelo de diseño y el modelo de visualización.

Herramientas software para la visualización de datos geoespaciales

Los datos geoespaciales ya han excedido la capacidad de almacenamiento y ahora se considera un problema de Big data, el documento [13] presenta una investigación referente al análisis crítico de las herramientas Whitebox GAT, ArcMap, GeoMesa, HadoopViz y GRASS GIS, diseñadas especialmente para la visualización de datos geoespaciales considerando la posibilidad de encontrar patrones y relaciones en los datos, únicamente, con la visualización de los mismos.

Clusterización

Los algoritmos de agrupamiento en la minería de datos, se consideran como técnicas de aprendizaje no supervisado porque buscan relaciones entre variables descriptivas, pero no las relaciones con respecto a una variable objetivo. En esta sección, se da respuesta a la pregunta: ¿Cuáles algoritmos de agrupamiento se han utilizado en la selección automática de sitios?, dado que se identificaron tres técnicas de agrupamiento que sirven de modelo para encontrar sitios y evaluar el potencial hidroeléctrico, en [18], los algoritmos Bat y Fuzzy intentan identificar ubicaciones ideales para pequeñas centrales hidroeléctricas y en [19], se utiliza el algoritmo K-means para establecer la capacidad de una micro central hidroeléctrica en India, de manera que estas investigaciones están ayudando a solucionar problemas mediante el procesamiento de grandes conjuntos de datos y procurando disminuir la necesidad de expertos en el tema.

Toma de decisiones con múltiples criterios

Esta técnica es una subdisciplina de la investigación de operaciones que evalúa múltiples criterios para la toma de decisiones. En esta sección se resuelve el interrogante: ¿Cómo seleccionar sitios automáticamente, considerando factores técnicos, sociales, económicos, ambientales, etc.?

La búsqueda de sitios apropiados para una pequeña central hidroeléctrica, es uno de los temas más sensibles en el éxito de su instalación, sin embargo, existen muchos criterios que, si no se analizan adecuadamente, pueden afectar la viabilidad de los proyectos hidroeléctricos. Entre los más importantes a considerar están, los factores técnicos o de ingeniería, sociales, económicos, ambientales, hidrológicos, topográficos, políticos y legales, estos elementos imponen restricciones que, se deben balancear adecuadamente para que los sitios encontrados, sean los más representativos. Las investigaciones de este tipo, deberían utilizar la técnica de toma de decisiones con múltiples criterios, para que los resultados tengan más preponderancia y realicen aportes no teóricos, como en muchos casos, sino más realistas, acorde con las características propias de las regiones donde se efectúen, con ello, se pueden dar garantías razonables, de que todas las partes interesadas no se verán afectadas de alguna manera.

Sistemas de apoyo a las decisiones

Las investigaciones en [20] y [21], presentan sistemas de apoyo a las decisiones utilizados en micro plantas hidroeléctricas en la Amazonía brasileña, considerando aspectos hidrológicos, topográficos, geotécnicos, ambientales, energéticos, económicos y sociales del sitio objetivo, asimismo, se emplearon para evaluar, comparar y clasificar diferentes alternativas de esquemas de energía hidroeléctrica en Nepal, teniendo en cuenta criterios económicos, sociales, ambientales y políticos.

Sistemas de apoyo a las decisiones basadas en sistemas información geográfica

Algunos de los trabajos mostraron el desarrollo de herramientas y métodos de apoyo a las decisiones basadas en SIG. En [22], evalúan sistemáticamente, todas las posibles alternativas de esquemas hidroeléctricos para ayudar a los tomadores de decisiones a evaluar el potencial hidroeléctrico en regiones con escasez de datos, la herramienta integra un modelo hidrológico distribuido y un método de clasificación para las evaluaciones, este enfoque permite la inclusión de factores topográficos e hidrológicos para la selección de los sitios apropiados. La referencia en [23], evalúa el potencial de las zonas donde se podría desarrollar una micro central hidroeléctrica utilizando la toma de decisiones multicriterio con cinco grupos de expertos en ingeniería, economía, ambiente, socioeconomía y participación comunitaria. El documento [24] propone un nuevo método para seleccionar sitios viables de pequeños proyectos hidroeléctricos combinando criterios de ingeniería,

económicos, ambientales y de impacto social. Los estudios en [26] y [33], utilizan métodos de análisis de decisión multicriterio mediante Sistemas de Información Geográfica para la selección automática de sitios.

Sistemas de apoyo a las decisiones con datos obtenidos de múltiples fuentes

En [25], se analizaron los principales desafíos que se enfrentan, al consumir datos de múltiples fuentes para aplicaciones ambientales, utilizando el enfoque de Datos Vinculados, se construyó un sistema para lograr una mejor interoperabilidad e integración de los datos. Los resultados muestran, cómo se puede construir y utilizar una Web de sensores vinculados, dentro del dominio de aplicación de soporte de decisiones de recursos hídricos.

Metodología

En esta sección, se precisa el procedimiento para realizar un mapeo sistémico sobre la selección automática de sitios para pequeñas centrales hidroeléctricas. Incluye las preguntas de investigación, las fuentes de información, las cadenas de búsqueda y los registros encontrados y depurados.

Preguntas de investigación

El estudio comienza a partir de las preguntas de investigación planteadas, por consiguiente, se realizó una búsqueda de artículos científicos relacionados, con la intención de obtener información relevante que soportará la argumentación de sus respuestas. La Figura 1 responde el interrogante: ¿Cómo fue el proceso de selección de referencias de la revisión?; la Figura 2 aclara la incógnita: ¿Qué países cuentan con investigaciones relacionadas con la selección de sitios para pequeñas centrales hidroeléctricas? En el transcurso del documento se da respuesta a otras preguntas de investigación adicionales a las definidas en esta sección.

Fuentes de Información

La búsqueda fue enfocada en las plataformas digitales más representativas para el acceso a documentos de revistas y conferencias publicadas en Internet, libros y sitios web de fuentes confiables como, por ejemplo: Scopus (Elseiver), Springer Link, ScienceDirect (Elseiver) Journals & Books, IEEE Xplore Digital Library, Google Scholar.

Cadenas de búsqueda

A continuación, se enumeran las ecuaciones de consulta utilizadas en los diferentes buscadores de referencias bibliográficas:

1. ((hydropower OR hydroelectric)) AND (("small scale")) AND ("site selection")
2. (hydropower OR hydroelectric) AND "small scale" AND "site selection" AND "renewable energy"
3. (hydropower OR hydroelectric) AND "small scale" AND "site selection" AND "renewable energy" (Filter by Article type: Research articles)
4. (hydropower OR hydroelectric) AND "small scale" AND "renewable energy"
5. (hydropower OR hydroelectric) AND "small scale" AND "site selection" AND "renewable energy" AND geospatial (Filter by year: Since 2010)

Los artículos de referencia se fueron seleccionando de acuerdo a la revisión detallada del título y del resumen de cada uno, en cada fuente de información se obtuvieron distintos resultados:

1. En Scopus se encontraron 69 referencias.
2. En Springer Link se encontraron 70 referencias.
3. En ScienceDirect Journals & Books se encontraron 101 referencias.
4. En IEEE Xplore Digital Library se encontraron 38 referencias.
5. En Google Scholar se encontraron 469 referencias.

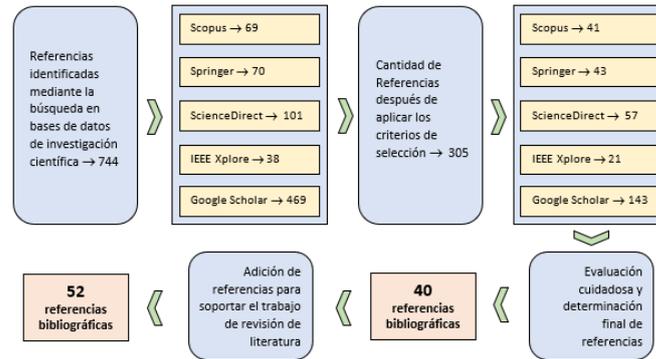
En el caso de Scopus, se realizó una búsqueda escalonada, es decir, primero se hizo la exploración con (hydropower OR hydroelectric) y el resultado fue 50.296 documentos, luego se volvió a efectuar otra búsqueda sobre los documentos obtenidos anteriormente, usando "small scale", en esta oportunidad se obtuvieron 2.351 documentos y, por último, la búsqueda sobre el anterior filtro se hizo con "site selection", logrando encontrar 66 documentos relacionados.

Criterios de selección

Posterior a la selección inicial de los artículos científicos, se efectuó una revisión exploratoria y analítica de cada referencia, intentando clasificarlos de acuerdo a la región y a las tecnologías computacionales utilizadas en cada investigación. Varios documentos fueron descartados en este proceso porque se distanciaban del propósito de este estudio, en consecuencia, los datos obtenidos se filtraron de acuerdo a los siguientes criterios:

1. Documentos duplicados.
2. Artículos que no se relacionaban claramente con la selección automática de sitios.
3. Información poco confiable, sin suficientes datos o precedentes de fuentes no reconocidas.
4. Estudios derivados de una misma investigación, pero, presentados en forma distinta.

Figura 2. Proceso de selección de referencias y filtro de documentos obtenidos



Fuente: Elaboración propia

Luego de aplicarse los filtros definidos por los criterios descritos anteriormente se presentan los resultados finales, asimismo, la Figura 2 despliega el proceso de selección de referencias y el filtro de los documentos obtenidos hasta llegar a la cantidad definitiva de referencias bibliográficas:

1. En la fuente de información Scopus, se encontraron 69 referencias, 28 de ellas fueron excluidas quedando un total de 41 documentos.
2. En la fuente de información Springer Link, se encontraron 70 referencias, 27 de ellas fueron excluidas quedando un total de 43 documentos.
3. En la fuente de información ScienceDirect Journals & Books, se encontraron 101 referencias, 44 de ellas fueron excluidas quedando un total de 57 documentos.
4. En la fuente de información IEEE Xplore Digital Library, se encontraron 38 referencias, 17 de ellas fueron excluidas quedando un total de 21 documentos.
5. En la fuente de información Google Scholar, se encontraron 469 referencias, 326 de ellas fueron excluidas quedando un total de 143 documentos.

Finalmente, se logró elegir 52 referencias bibliográficas que dan el soporte a esta revisión, las cuales, permitieron definir el horizonte hacia la construcción de una herramienta inteligente, capaz de seleccionar sitios automáticamente para pequeñas centrales hidroeléctricas.

Análisis de información

En esta subsección se da respuesta a la pregunta: ¿Cuál es la tecnología que más se ha empleado en la selección de sitios?

En América Latina se han realizado algunas investigaciones alrededor de la selección automática de sitios para pequeñas centrales hidroeléctricas, sin embargo, Colombia aún no ha publicado estudios de este tipo en las

principales revistas científicas y bases de datos de referencias bibliográficas, aunque, en [51], se realiza una revisión de requerimientos para implementar proyectos de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas presentando la situación actual de la técnica a nivel nacional e internacional, así como las tecnologías más eficientes y aptas para su implementación.

La investigación permitió establecer que, las tecnologías computacionales relacionadas con la inteligencia artificial como: Big Data y el análisis de datos geoespaciales representada por el 48% de los artículos relacionados en esta revisión, algoritmos de agrupamiento con el 4%, metodologías de toma de decisiones con múltiples criterios con el 15% y el análisis visual de datos con el 8% de las referencias, tienen gran importancia y están involucradas con la ubicación automática de sitios para pequeñas centrales hidroeléctricas, al mismo tiempo, se logró notar que la gran mayoría de las investigaciones tienen una fuerte relación con los sistemas de información geográfica en el análisis de grandes volúmenes de datos vinculados a referencias espaciales. El 25% restante de los artículos referidos constituyen otros métodos informáticos, Atlas Interactivos y datos no procesados.

Es importante destacar que la información geoespacial es indispensable para el desarrollo de muchos proyectos científicos que pueden estar en diversos campos del conocimiento como la ingeniería, las ciencias sociales y de la salud, la economía, la política, entre otras, para que posibiliten un mayor aprovechamiento sostenible de los recursos y en consecuencia, brinden la posibilidad de realizar estudios en regiones de difícil acceso en donde los datos disponibles son insuficientes, prescindiendo del desplazamiento y levantamiento de información en el sitio de estudio.

Existen diversas herramientas y tecnologías informáticas, como se puede apreciar en [50], que se pueden utilizar en la evaluación de las capacidades hidroeléctricas de una región, en función de la información espacial de sus cuencas hidrográficas, naciones como: Canadá, Francia, Italia, Noruega, Escocia, Estados Unidos, entre otras, han utilizado los sistemas de información geográfica y el paquete de productos de software ArcGIS para crear modelos y metodologías que posibiliten el descubrimiento del potencial hidroeléctrico teórico de las regiones.

En la mayoría de los artículos evaluados en esta revisión, se consiguió evidenciar que se construyeron herramientas a la medida y que son aplicables exclusivamente, en la región objeto de estudio, en parte, debido a que se configuraron con parámetros y criterios propios de la zona, si bien, esto disminuye la complejidad en el desarrollo del trabajo, no es lo óptimo, teniendo en cuenta que existen numerosas similitudes entre algunas regiones del planeta, lo que en teoría, brindaría más flexibilidad en la aplicación de estas herramientas.

Resultados y discusión

Este documento presenta una revisión sistemática de las investigaciones realizadas alrededor del planeta, en temas relacionados con la selección automática de sitios y la evaluación del potencial de pequeñas centrales hidroeléctricas, en Suramérica se encontraron ejemplos de proyectos [20, 31, 32, 33], relacionados con la selección automática de sitios para pequeñas centrales hidroeléctricas, sin embargo, menos del 10% de los artículos examinados en esta investigación, se han realizado en esta región del subcontinente, lo que indica que es un campo donde se puede explorar un poco más con el objetivo de lograr un mejor aprovechamiento de los recursos, países como Colombia aún no tiene registros de publicaciones en estudios de este tipo, en consecuencia, esta revisión constituye un paso importante que podría desencadenar otras investigaciones que conlleven a un mejor aprovechamiento de sus recursos hídricos.

Un sistema de geolocalización automática de sitios y evaluación del potencial de pequeñas centrales hidroeléctricas para países en desarrollo como Colombia es indispensable y probablemente, va a marcar la diferencia, especialmente, porque se pretende aplicar en regiones distanciadas del centro del país que han sido afectadas por la violencia y donde el abandono del estado es evidente, además, porque la población rural dispersa en esas regiones, representa un alto porcentaje como se puede ver en [7] y porque el índice de acceso al servicio de energía eléctrica es bajo, teniendo en cuenta el Mapa de acceso a servicios públicos del DANE [8]; una de las motivaciones a través de este tipo de proyectos, consiste en animar a las entidades del gobierno local y nacional para que continúen propiciando la cultura investigativa en beneficio de estas comunidades que tanto lo necesitan.

El desarrollo de este tipo de herramientas es viable porque eventualmente coadyuban en la transformación de la matriz energética de las regiones gracias a que sus resultados contribuyen a la implementación de microrredes eléctricas capaces de integrar energías renovables que favorecen el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, incrementando la calidad y la disponibilidad de la energía eléctrica basados en indicadores claves de desempeño (KPI, Key performance indicator) y con un impacto ambiental no negativo, suficiente para garantizar el legado de las generaciones futuras.

La construcción de un prototipo inteligente de esta categoría en Colombia, requiere de la respuesta de una serie de preguntas relacionadas con la viabilidad técnica como: ¿Existen los conjuntos de datos meteorológicos disponibles?, ¿Se cuenta con los expertos en el tema?, ¿Se dispone de las tecnologías necesarias? Estos interrogantes deben ser abordados detalladamente en la elaboración de un prototipo, de no hacerlo, las

probabilidades de aplicabilidad en distintas regiones disminuyen, limitándose a un solo lugar de aplicación.

Según el documento CONPES [52] (Consejo Nacional de Política Económica y Social) número 3969 del Departamento Nacional de Planeación aprobado el 13 de septiembre de 2019, el cual, emite un concepto favorable a la Nación para respaldar el financiamiento de iniciativas de energías renovables y eficiencia energética, en el literal 3. Justificación, menciona que la matriz de generación eléctrica colombiana muestra una alta participación de energías renovables convencionales, tomando en cuenta que cerca del 63,3% de la capacidad instalada es hidroeléctrica (gran y pequeña escala sumando 11,8 GW). Sin embargo, las Fuentes No Convencionales de Energía Eléctrica, FNCER, solo representan el 6% en la matriz eléctrica, considerando las fuentes de energía hidroeléctrica de pequeña escala. Lo definido en el CONPES resulta en un buen indicador para posibilitar el desarrollo de sistemas interactivos de geolocalización automática de sitios.

En Colombia es factible el desarrollo de este tipo de proyectos, gracias a que existen diversas entidades públicas como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), asimismo, existen plataformas de acceso abierto en Internet, como: el portal de datos abiertos de Colombia, el portal del sistema eléctrico colombiano y los diferentes atlas interactivos guiados por satélites, tales como: los servicios de Google para la exploración del planeta, USGS Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos, la Agencia Espacial Europea (ESA), la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), el portal de datos de sensores remotos del Alaska Satellite Facility, Global Land Cover Facility de la Universidad de Maryland en Estados Unidos con apoyo de la NASA, la plataforma Landsat Explorer construida a partir de una serie de satélites construidos y puestos en órbita por los Estados Unidos y la Interfaz interactiva de la NASA EOSDIS Worldview, entre muchos más, que proporcionan imágenes satelitales de diferentes características y de una gran variedad de conjuntos de datos estructurados (tablas, hojas de cálculo, bases de datos relacionales), semiestructurados (HTML, XML, JSON) y no estructurados (PDF, imágenes, audio, video) disponibles, almacenados en distintos formatos y dispuestos en diferentes dimensiones; gracias a estas fuentes se puede acceder a datos hidrológicos, meteorológicos y geográficos, además, en Colombia coexisten Universidades públicas y privadas de gran trascendencia, que cuentan con expertos en distintas áreas y que también, están contribuyendo en la formación de investigadores de alto nivel en los diversos campos del conocimiento [53].

En esta revisión se encontraron múltiples modelos, herramientas y tecnologías apropiadas para ser utilizados en la construcción de un prototipo inteligente que permita la selección automática de sitios para pequeñas centrales hidroeléctricas en Colombia, la Tabla 1 presenta información sobre

las principales características de los conjuntos de datos de interés para el desarrollo de un proyecto de esta categoría.

Tabla 1. Características de los Conjuntos de Datos

Descripción	Formato	Volumen	Tipo de dato	Acceso
Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM	CSV, JSON, XML	5 MB	Estructurado, Semiestructurado	Si
Seguimiento y caracterización del clima	Shapefile	2 MB	No estructurado	Si
Escenarios Cambio Climático - Clima Futuro	Shapefile	2 MB	No estructurado	Si
Promedio de Precipitación y Temperatura media	CSV, JSON, XML	10 MB	Estructurado, Semiestructurado	Si
Sistema eléctrico colombiano	HTML, PDF	50 MB	Semiestructurado, No estructurado	
Atlas Geológico de Colombia	PDF	3 MB	No estructurado	No
Mapa Geológico de Colombia	Shapefile, CSV, JSON	250 MB	Estructurado, Semiestructurado, No estructurado	Si
Zonificación Hidrográfica 2013	Shapefile, CSV, JSON	200 MB	Estructurado, Semiestructurado, No estructurado	Si
Visor de Datos Instantáneos del IDEAM	HTML, JPG	35 MB	Semiestructurado, No estructurado	No
Cartografía y Geografía del IGAC	Shapefile, Geodatabase	2.5 GB	Estructurado, No estructurado	Si
Imágenes satelitales de Google Earth	JPG	100 MB	No estructurado	Si
Modelos de elevación digital	Shapefile	650 MB	No estructurado	Si
Imágenes satelitales, fotografías aéreas y productos cartográficos	Shapefile	1.2 GB	No estructurado	Si
Imágenes satelitales de la Agencia Espacial Europea	Shapefile	900 MB	No estructurado	Si
Modelos digitales de superficie	Shapefile	550 MB	No estructurado	Si
Geología, vegetación, agricultura y ciudades	TIF	420 MB	No estructurado	Si
Gestión de incendios forestales, calidad del aire	TIF	820 MB	No estructurado	Si

Fuente: Elaboración propia

Se desconocen las principales razones por las que, aun no se ha construido una herramienta inteligente de uso global para la selección automática de sitios para pequeñas centrales hidroeléctricas, es decir, que su aplicación no se limite a una sola región en específico, los estudios evaluados en esta revisión no profundizan en el tema y en muchos de ellos, no existe una relación directa con el estudio de los diversos factores técnicos, sociales, económicos, ambientales, entre otros, que son trascendentales y

característicos de cada territorio y que de alguna manera pueden incidir directamente la selección de los sitios apropiados.

Se sugiere la continuación de la investigación para la construcción de una herramienta inteligente que permita la selección automática de sitios para pequeñas centrales hidroeléctricas, integrando datos geospaciales y la aplicación de técnicas de inteligencia artificial para el procesamiento apropiado de los conjuntos de datos, de la misma manera, la inclusión de diversos factores que se consideren relevantes para el beneficio de todas las partes involucradas en el desarrollo de este tipo de proyectos.

Conclusiones

Muchas regiones en el mundo están evaluando el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales en la generación de energía eléctrica limpia a partir de fuentes renovables, dicha tendencia se está dando gracias a la sensibilización de los pueblos y sus gobernantes acerca de la importancia de conservar el ambiente para las generaciones futuras, algunos países de Latinoamérica ya cuentan con investigaciones relacionadas con la selección automática de sitios para pequeñas centrales hidroeléctricas, sin embargo, Colombia es un país que aún no ha profundizado en este tema, aunque es rico en recursos hídricos y posee una baja cobertura en el servicio de energía eléctrica, sobre todo en gran parte de sus áreas rurales.

Colombia es un país que podría obtener grandes beneficios si se construyera una herramienta capaz de evaluar su potencial hidroeléctrico a pequeña escala porque le daría posibilidades al gobierno para ayudar a las comunidades más remotas que en muchos casos, son víctimas del conflicto armado y del abandono del estado, permitiéndoles iniciar un proceso de desarrollo que aportaría mucho en el mediano y largo plazo, al equilibrio económico del país y con ello, a la disminución de los índices de violencia y corrupción que han afectado a sus habitantes durante varias décadas.

Construir una herramienta de este tipo para Colombia es posible puesto que actualmente existen muchas fuentes nacionales e internacionales que pueden contribuir con los conjuntos de datos necesarios para su análisis y posterior procesamiento como lo demuestra la Tabla I, además, desde hace algunos años ya se cuenta con expertos en diversas áreas que se han venido especializando constantemente gracias a la producción de investigaciones innovadoras que han tenido gran relevancia para la ciencia y que su aporte ha sido trascendental en la generación de nuevo conocimiento.

Las investigaciones realizadas hasta ahora no evidencian la construcción de una herramienta con la capacidad para identificar y seleccionar sitios automáticamente en cualquier región del planeta, en parte, porque cada territorio tiene sus propias características geográficas, sociales, económicas y ambientales, lo que incrementa la complejidad en la elaboración de un prototipo con las funcionalidades antes mencionadas, sin embargo, las

posibilidades han aumentado en los últimos años gracias a la aplicación de técnicas de inteligencia artificial.

Referencias bibliográficas

1. S. Bilgen, K. Kaygusuz, y A. Sari, "Renewable Energy for a Clean and Sustainable Future", *Energy Sources*, vol. 26, n°. 12, pp. 1119-1129, oct. 2004, DOI: <https://doi.org/10.1080/00908310490441421>.
2. A. O. Pereira, J. B. Soares, R. G. de Oliveira, y R. P. de Queiroz, "Energy in Brazil: Toward sustainable development?", *Energy Policy*, vol. 36, n.o 1, pp. 73-83, ene. 2008, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.08.022>.
3. J. L. da S. Soito y M. A. V. Freitas, "Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: Vulnerability, 2 impacts and possibilities for adaptation to global climate change", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n.o 6, pp. 3165-3177, ago. 2011, DOI: <https://doi.org/10.1016/10.1016/j.rser.2011.04.006>.
4. T. Abbasi y S. A. Abbasi, "Small hydro and the environmental implications of its extensive utilization", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n.o 4, pp. 2134-2143, may 2011, DOI: <https://doi.org/10.1016/10.1016/j.rser.2010.11.050>.
5. S. Mishra, S. K. Singal, y D. K. Khatod, "Optimal installation of small hydropower plant—A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n.o 8, pp. 3862-3869, oct. 2011, DOI: <https://doi.org/10.1016/10.1016/j.rser.2011.07.008>.
6. K. Kaygusuz, "Hydropower and the World's Energy Future", *Energy Sources*, vol. 26, n.o 3, pp. 215-224, feb. 2004, DOI: <https://doi.org/10.1016/10.1080/00908310490256572>.
7. A. F. Castro, N. G. Arteaga, G. Llinás, y D. A. Mora, "Definición de Categorías de Ruralidad", Departamento Nacional de Planeación, 013652, sep. 2015.
8. Story Map Series. [En línea]. Disponible en: <https://dane.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=2749922ca5f8469db9990986c02b1b93>. [Accedido: 01-oct-2019].
9. Atlas Interactivo - Climatológico - IDEAM. [En línea]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html#>. [Accedido: 01-oct-2019].

10. A. Subramanian, "Empowering geo spatial analysis with big data platform: Natural resource management", *2016 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC)*, 2016, pp. 1–6, DOI: <https://doi.org/10.1016/10.1109/ICCIC.2016.7919693>.
11. S. Eom, S. Shin, y K. Lee, "Spatiotemporal query processing for semantic data stream", *Proceedings of the 2015 IEEE 9th International Conference on Semantic Computing (IEEE ICSC 2015)*, 2015, pp. 290–297, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICOSC.2015.7050822>.
12. A. Saber, A. M. Al-Zoghby, y S. Elmougy, "Big-Data Aggregating, Linking, Integrating and Representing Using Semantic Web Technologies", *The International Conference on Advanced Machine Learning Technologies and Applications (AMLTA2018)*, 2018, pp. 331–342.
13. R. K. Barik, R. K. Lenka, S. M. Ali, N. Gupta, A. Satpathy, y A. Raj, "Investigation into the efficacy of geospatial big data visualization tools", *2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*, 2017, pp. 88–93, DOI: <https://doi.org/10.1109/CCAA.2017.8229777>.
14. R. Goncalves, M. Ivanova, F. Alvanaki, J. Maassen, K. Kyzirakos, y O. Martinez Rubi, "A Round Table for Multi-disciplinary Research on Geospatial and Climate Data", *2015 IEEE 11th International Conference on e-Science, 2015*, pp. 165–170, DOI: <https://doi.org/10.1109/eScience.2015.65>.
15. J.D. Fekete, J.J. van Wijk, J.T. Stasko, y C. North, "The Value of Information Visualization", *Information Visualization: Human-Centered Issues and Perspectives*, A. Kerren, J. T. Stasko, J.-D. Fekete, y C. North, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 1-18.
16. D. Keim, G. Andrienko, J.D. Fekete, C. Görg, J. Kohlhammer, y G. Melançon, "Visual Analytics: Definition, Process, and Challenges", *Information Visualization: Human-Centered Issues and Perspectives*, A. Kerren, J. T. Stasko, J.-D. Fekete, y C. North, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 154-175.
17. B. H. Sibolla, S. Coetzee, y T. L. Van Zyl, "A Framework for Visual Analytics of Spatio-Temporal Sensor Observations from Data Streams", *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 7, n.o 12, p. 475, Diciembre 2018, DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi7120475>.

18. M. Majumder, "Comparison of Bat and Fuzzy Clusterization for Identification of Suitable Locations for a Small-Scale Hydropower Plant", *Application of Nature Based Algorithm in Natural Resource Management*, M. Majumder y R. N. Barman, Eds. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013, pp. 135–155.
19. S. P. Adhau, R. M. Moharil, y P. G. Adhau, "K-Means clustering technique applied to availability of micro hydro power", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 8, pp. 191–201, Diciembre 2014, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.09.001>.
20. C. J. C. Blanco, Y. Secretan, y A. L. A. Mesquita, "Decision support system for micro-hydro power plants in the Amazon region under a sustainable development perspective", *Energy for Sustainable Development*, vol. 12, n.o 3, pp. 25–33, sep. 2008, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60435-4](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60435-4).
21. R. P. Singh y H. P. Nachtnebel, "Decision aid for hydropower project prioritisation in Nepal by applying Visual PROMETHEE", *International Journal of Multicriteria Decision Making*, vol. 6, n.o 4, pp. 316–342, 2016, DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMCDM.2016.081389>.
22. A. Moiz, A. Kawasaki, T. Koike, y M. Shrestha, "A systematic decision support tool for robust hydropower site selection in poorly gauged basins", *Applied Energy*, vol. 224, pp. 309–321, Agosto 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.070>.
23. C. Waisurasingha, P. Chindaprasirt, W. Sri-Amporn, y S. Chuangcham, "The utilization of geographic information systems and multi-criteria decision making with local community participation for selection of site for micro hydropower project: A case study of Chi river Basin, Thailand", 2012, vol. 2, pp. 1201–1205.
24. P. Rojanamon, T. Chaisomphob, y T. Bureekul, "Application of geographical information system to site selection of small run-of-river hydropower project by considering engineering/economic/environmental criteria and social impact", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n°. 9, pp. 2336–2348, Diciembre 2009, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.003>.
25. L. Yu y Y. Liu, "Using Linked Data in a heterogeneous Sensor Web: challenges, experiments and lessons learned", *International Journal of Digital Earth*, vol. 8, n°. 1, pp. 17–37, Enero 2015, DOI: <https://doi.org/10.1080/17538947.2013.839007>.

26. D. A. Q. Badang, C. F. Sarip, y A. P. Tahud, "Geographic Information System (GIS) and Multicriteria Decision Making (MCDM) for Optimal Selection of Hydropower Location in Rogongon, Iligan City", *2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*, 2018, pp. 1-5, DOI: <https://doi.org/10.1109/HNICEM.2018.8666266>.
27. Visualization: GeoChart | Charts, Google Developers. [En línea]. Disponible en: <https://developers.google.com/chart/interactive/docs/gallery/geochart>. [Accedido: 01-oct-2019].
28. R. Monk, S. Joyce, y M. Homenuke, "Rapid hydropower assessment model: Identify hydroelectric sites using geographic information systems", en *Proceedings of the Small Hydro Conference 2009*, 2009, pp. 28–29.
29. G. Carroll, K. Reeves, R. Lee, y S. Cherry, "Evaluation of potential hydropower sites throughout the United States", en *ESRI User Conference*, 2004.
30. B. Meza-Prieto y J. Aparicio, "Evaluation of small-scale hydropower potential in watersheds using a rainfall-runoff model", *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 9, n.o 1, pp. 69-87, 2018, DOI: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-01-05>.
31. D. G. Larentis, W. Collischonn, F. Olivera, y C. E. M. Tucci, "Gis-based procedures for hydropower potential spotting", *Energy*, vol. 35, n.o 10, pp. 4237–4243, oct. 2010, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.014>.
32. N. Wegner, E. Mercante, I. de Souza Mendes, D. Ganascini, M. Metri Correa, M. Furlan Maggi *et al.*, "Hydro energy potential considering environmental variables and water availability in Paraná Hydrographic Basin", *Journal of Hydrology*, vol. 580, p. 124183, ene. 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124183>.
33. Romanelli João Paulo, Silva Luiz G. M., Horta Ana, y Picoli Rogério A., "Site Selection for Hydropower Development: A GIS-Based Framework to Improve Planning in Brazil", *Journal of Environmental Engineering*, vol. 144, n°. 7, p. 04018051, jul. 2018, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001381](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001381).
34. D. Connolly, S. MacLaughlin, y M. Leahy, "Development of a computer program to locate potential sites for pumped hydroelectric energy storage", *Energy*, vol. 35, n°. 1, pp. 375–

381, Enero 2010,
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.10.004>.

35. J. Félix y A. Dubas, "Use of GIS to identify potential sites for small hydroelectric plants: general concepts and exemple of application", *Proceedings of the International Conference HIDROENERGIA 2010*, 2010.
36. Y. Bayazit, R. Bakış, y C. Koç, "An investigation of small scale hydropower plants using the geographic information system", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 289–294, Enero 2017, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.062>.
37. G. Garegnani, S. Sacchelli, J. Balest, y P. Zambelli, "GIS-based approach for assessing the energy potential and the financial feasibility of run-off-river hydro-power in Alpine valleys", *Applied Energy*, vol. 216, pp. 709-723, abr. 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.043>.
38. A. Palla, I. Gnecco, P. La Barbera, M. Ivaldi, y D. Caviglia, "An Integrated GIS Approach to Assess the Mini Hydropower Potential", *Water Resour Manage*, vol. 30, n°. 9, pp. 2979-2996, jul. 2016, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1318-6>.
39. A. Korkovelos, D. Mentis, S.H. Siyal, C. Arderne, H. Rogner, M. Bazilian, *et al.*, "A Geospatial Assessment of Small-Scale Hydropower Potential in Sub-Saharan Africa", *Energies*, vol. 11, n°. 11, p. 3100, nov. 2018, DOI: <https://doi.org/10.3390/en11113100>.
40. D. Bergström y C. Malmros, "Finding potential sites for small-scale hydro power in Uganda : a step to assist the rural electrification by the use of GIS : a minor field study", *Lunds universitets Naturgeografiska institution - Seminarieuppsatser*, 2005.
41. C.-S. Yi, J.H. Lee, y M.-P. Shim, "Site location analysis for small hydropower using geo-spatial information system", *Renewable Energy*, vol. 35, n°. 4, pp. 852–861, Abril 2010, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.003>.
42. S. Dudhani, A. K. Sinha, y S. S. Inamdar, "Assessment of small hydropower potential using remote sensing data for sustainable development in India", *Energy Policy*, vol. 34, n°. 17, pp. 3195–3205, nov. 2006, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.06.011>.
43. S. Das y P. K. Paul, "Selection of Site for Small Hydel Using GIS in the Himalayan Region of India", *Journal of Spatial Hydrology*, vol. 6, n°. 1, may 2006.

44. B. C. Kusre, D. C. Baruah, P. K. Bordoloi, y S. C. Patra, "Assessment of hydropower potential using GIS and hydrological modeling technique in Kopili River basin in Assam (India)", *Applied Energy*, vol. 87, n°. 1, pp. 298–309, Enero 2010, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.019>.
45. D. Setiawan, "Potential Sites Screening for Mini Hydro Power Plant Development in Kapuas Hulu, West Kalimantan: A GIS Approach", *Energy Procedia*, vol. 65, pp. 76–82, Enero 2015, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.01.034>.
46. B. Feizizadeh y E. M. Haslauer, "GIS-based procedures of hydropower potential for Tabriz basin, Iran", *International Journal*, pp. 495–502, 2012.
47. A. A. Ghadimi, F. Razavi, y B. Mohammadian, "Determining optimum location and capacity for micro hydropower plants in Lorestan province in Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n°. 8, pp. 4125–4131, oct. 2011, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.003>.
48. B. Serpoush, M. Khanian, y A. Shamsai, "Hydropower plant site spotting using geographic information system and a MATLAB based algorithm", *Journal of Cleaner Production*, vol. 152, pp. 7–16, may 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.095>.
49. A. Z. Zaidi y M. Khan, "Identifying high potential locations for run-of-the-river hydroelectric power plants using GIS and digital elevation models", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 106–116, jun. 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.025>.
50. P. Punys, A. Dumbrasukas, A. Kvaraciejus, y G. Vyciene, "Tools for Small Hydropower Plant Resource Planning and Development: A Review of Technology and Applications", *Energies*, vol. 4, n°. 9, pp. 1258–1277, sep. 2011, DOI: <https://doi.org/10.3390/en4091258>.
51. S. Morales, L. Corredor, J. Paba, y L. Pacheco, "Stages in the development of a small hydropower project: Context and implementation basic criteria", *DYNA*, vol. 81, n°. 184, p. 178, abr. 2014, DOI: 10.15446/dyna.v81n184.39757.
52. Documentos CONPES. [En línea]. Disponible en: <https://www.dnp.gov.co/CONPES/documentos-conpes/Paginas/documentos-conpes.aspx#k=>. [Accedido: 03-dic-2019].

53. J. A. Calderón Velasco, G. A. Amarillo Cárdenas, L. A. Silva Bahamon, y C. G. Donoso Albarracín, «Biometría dactilar: una nueva alternativa de controlar efectivamente la asistencia a clases», *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 6, n.º 1, pp. 27-39, 2017. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.6.1.2773>