



ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS PARA LA LOCALIZACIÓN DE MICROCENTRALES HIDROELÉCTRICAS UTILIZANDO SIG. CASO APLICATIVO: TRES CUENCAS DEL VALLE DE ABURRA, MEDELLÍN

Analysis of methodologies for locating small hydropower using GIS. CASE APPLICATION: Valle de Aburrá, Medellín

Ruth N. Correa¹

Artículo de Revisión

Recibido: 22 de abril de 2016

Aprobado: 30 de noviembre de 2017

Publicado: 10 de agosto de 2018

¹Ingeniera Civil, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería; Universidad de Antioquia. Medellín – Colombia. Correo electrónico: ruth.nohemy@gmail.com

Keywords: hydropower potentials; small hydropower, Geographic information systems (GIS)

Palabras clave: Potencial hidroeléctrico, microcentrales hidroeléctricas, Sistemas de información geográficas (SIG)

Cómo citarlo: Correa RN. Análisis de Metodologías para la localización de Microcentrales Hidroeléctricas Utilizando SIG. Caso Aplicativo: Tres Cuencas Del Valle De Aburra, Medellín. Revista Científica en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad (CAS). 4(1), 1-31, julio – diciembre 2018

URL: <https://aprendeonline.udea.edu.co/revistas/index.php/CAA>

Resumen: El siguiente trabajo contiene una revisión bibliográfica de algunas metodologías para la localización de potenciales de energía hidráulica en cuencas por medio de la implementación de sistemas de información geográfica (SIG). Estas metodologías se orientan específicamente a la localización de microcentrales hidroeléctricas en el territorio colombiano, como una medida de mitigación a las problemáticas de algunas regiones que no pertenecen al Sistema Interconectado Nacional (SIN). Las microcentrales hidroeléctricas surgen como una alternativa limpia para la generación de energía eléctrica en zonas donde las condiciones geográficas impiden la llegada de este servicio a través del SIN; aprovechando de una manera eficiente los recursos hídricos de la región y generando el menor impacto ambiental posible. En este artículo se hace un análisis de tres metodologías en ArcGis y se concluye con un modelo general aplicado al Valle de Aburra; este se desarrolla con los softwares de MapWindow y ArcGis, utilizando información georeferenciada de usos del suelo, litología, precipitaciones medias, caminos, hidrología etc. Aplicando el modelo se obtienen 4 lugares aptos para la implementación de este tipo de proyecto.

Abstract: The following work has a bibliographic revision about some methodologies for localization of hydraulic potentials of energy in basins; by the implementation of Geographic information systems (GIS). The methodologies are specifically pointed to the localization of small-hydropower projects in Colombia, as a measure of mitigation to the issues of some regions which do not belong to the Sistema Interconectado Nacional (SIN). The small-hydropower appeared as a clean alternative for the generation of electric energy in areas where the geographic conditions prevent the arrival of this service through SIN; taking advantages of the hydric resources of the region in an efficient way and generating the least possible environmental impact. In this article, an analysis of three methodologies in ArcGis is made and is concluded with a general model employed in Valle de Aburra; this is developed with the MapWindow and ArcGis software, using information which is geographically referenced about soil uses, lithology, precipitation mean, roads and hydrology. Applying the model four ideal places are obtained for the implementation of these kinds of projects.

1 Introducción

Los proyectos de generación de energía eléctrica alternativos (microcentrales), surgen como una respuesta a las problemáticas existentes en algunas regiones del país alejadas o también conocidas como zonas no interconectadas (ZNI). Las ZNI se definieron como aquellas áreas geográficas donde no se presta el servicio público de electricidad a través del sistema interconectado nacional (Artículo 11,

ley 143 de 1994). Estas se caracterizan por su baja densidad poblacional, por estar ubicadas a una gran distancia de los centros urbanos, por la dificultad de acceso y por su gran riqueza de recursos naturales. Por esto, resulta tan costoso integrarlas al SIN (Sistema Interconectado Nacional), por lo tanto se hace necesario que la producción y prestación del servicio se genere directamente en cada zona aprovechando de forma adecuada la abundancia de recursos, con ello se busca implementar tecnologías amigables con el medio

ambiente que den respuesta a las problemáticas energéticas de estas comunidades, con el fin de disminuir el uso de las fuentes tradicionales de generación de energía tales como plantas diésel y la utilización de leña como recurso para el consumo doméstico ya que esta contribuye a la deforestación de los bosques. (UPME, 2011).

Colombia, por su posición geoespacial, presenta grandes potenciales de recursos energéticos renovables y alternativos, como son: Sol, viento, un alto potencial hidráulico, biomasa, energía de los océanos y geotermia. Estos recursos, en la medida en que existen estudios iniciales, buscan la implementación de la tecnología de las microcentrales aprovechando las diferentes fuerzas de la naturaleza con un mínimo impacto ambiental y mejorando los índices de calidad de vida de las regiones donde se implementen, dando un paso en el desarrollo del país¹.

Las microcentrales eléctricas generan energía aprovechando el caudal o un desnivel en el alineamiento de un río, la fuerza del viento o la radiación del sol. En nuestro estudio nos concentraremos en la metodología para la localización de los lugares con mayor potencial hidráulico utilizando herramientas SIG.

1.1 Panorama colombiano

Colombia tiene una superficie total de 1'141.748 km²; siendo el tercer país más grande de América del Sur. En cuanto a su posición mundial frente al recurso hídrico, ocupa el séptimo puesto en el ranking de los países con mayor disponibilidad de recursos hídricos renovables tras Brasil, Rusia, USA, Canadá, Indonesia y China (IDEAM, 2010). Esto sumado a su posición geográfica estratégica con respecto al ecuador y a tener un relieve propicio para la construcción de presas, hacen que Colombia sea un país con un alto potencial para la generación de energía eléctrica a partir de energía hidráulica.

Para 2010 en Colombia, la generación de energía eléctrica en el sistema interconectado nacional (SIN) fue de 56.887,4 GWH, de los cuales el 78,2% es de generación hidráulica; posicionándose como el cuarto país de América Latina y el Caribe en la generación de energía hidroeléctrica; el 16,5% es de generación térmica y el 5,3 % restante corresponde a la generación menor y a los cogeneradores ². Las generaciones menores hacen referencia a pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), los cuales son proyectos hidroeléctricos a pequeña escala, orientados al aprovechamiento eficiente del recurso hídrico produciendo un menor impacto ambiental, ya que no utilizan presas.

La creciente demanda de energía eléctrica por parte del sector industrial, como del consumo doméstico por parte de la ZNI y SIN hacen que se esté pensando continuamente en nuevos sitios y tecnologías de aprovechamiento energético para satisfacer esta demanda, de forma tal que se aprovechen los recursos renovables del país y se implementen nuevas tecnologías más limpias para la

generación de energía de tal forma que reduzcan la producción de gases de invernadero y sean amigables con el ambiente.

1.2 Tipos de energía limpias

Debido a la crisis energética mundial, al cambio climático y a las nuevas políticas ambientales, la generación de energía a partir de recursos renovables ha tomado gran importancia en nuestro país y en el mundo entero, donde el 20% del consumo de energía eléctrica es satisfecha por la implementación de energías limpias aprovechando los recursos renovables tales como el agua, el sol, el viento entre otros. A continuación, se explican cada una de esas fuentes de energía y se dicen posibles localizaciones donde se podrían implementar en Colombia.

1.2.1 Energía solar

El sol constituye una fuente importante de energía limpia y abundante en muchas partes del mundo, por esta razón se puede considerar como una fuente renovable. Con el fin generar energía eléctrica a partir de este recurso; una de las técnicas es aprovechar la radiación solar que llega a la tierra, a partir de celdas fotovoltaicas.

Este tipo de energía no genera emisiones y es silenciosa. Además, es una de las pocas tecnologías renovables que pueden ser integradas al paisaje urbano y es útil en zonas rurales de difícil acceso. En Colombia se podría generar en mayor escala en zonas del Magdalena, La Guajira, San Andrés y Providencia. La utilización de energía solar aún no se ha difundido puesto que su uso es todavía tres o cuatro veces más costoso que el de otras fuentes renovables de energía. (UPME, 2011).

1.2.2 Energía eólica

El viento es aire en movimiento, este movimiento de las masas de aire se origina por diferencia de temperatura causada por la radiación solar sobre la tierra. Cuando el aire se calienta, su densidad se hace menor y sube, mientras que las capas frías descienden, así se establece una doble corriente de aire.

La energía eólica puede transformarse principalmente en energía eléctrica por medio de aerogeneradores, o en fuerza motriz empleando molinos de viento. Es una energía segura, pero tiene las desventajas de que la velocidad del viento es variable y poco confiable, los aerogeneradores producen ruido y la vida silvestre puede verse afectada.

En Colombia la zona norte cuenta con las mejores potencialidades para generar este recurso. Por ejemplo, en la Alta Guajira, Empresas Públicas de Medellín (EPM) puso en funcionamiento el primer parque eólico, Jepirachí, con 15 aerogeneradores que aportan 19,5 megavatios al Sistema Interconectado Nacional. (UPME, 2011).

¹ Sistema de Información de eficiencia energética y energías alternativas, SI3EA; PDF Energía renovable descripción tecnología y usos finales. <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Iluminacion/CarFNCE.pdf>

² Expertos en mercadeo, Informe Ejecutivo; septiembre de 2010. XM SA. <http://www.xm.com.co/BoletinXM/Pages/MECOct12.aspx>

1.2.3 Energía hidráulica

La energía hidráulica tiene como principio pasar de energía potencia (desnivel en un río) a energía eléctrica mediante la utilización de una planta de generación hidráulica y de la fuerza del agua.

La hidroelectricidad es un método altamente eficiente en la generación de electricidad y no contamina; el gran inconveniente que presenta la generación de energía mediante este método es el gran impacto ambiental debido a la construcción de represas y a la inundación de predios. Esto se hace para grandes centrales hidroeléctricas.

Aplicando el mismo principio de una forma más eficiente se tiene las micro centrales, las cuales son centrales eléctricas que aprovechan del desnivel y el caudal de un río, pero sin necesidad de construir una presa y generar un embalse.

1.2.4 Microcentrales hidroeléctricas

El término de microcentrales hidroeléctricas ha sido muy discutido a nivel mundial ya que no se tiene una normativa específica que determine la altura máxima de caída de tal obra o la capacidad de generación de la misma. Por lo tanto, la clasificación de estas varía según el estado o país donde se vaya a hacer el estudio de localización.

Las clasificaciones pueden variar para pequeñas centrales entre 2,5 y 25MW de potencia instalada, aunque la capacidad de instalación más aceptada a nivel mundial es de 10MW lo cual puede convertirse en una norma general de aceptación para pequeñas centrales. En China oficialmente se le asigna este nombre a los proyectos con 25MW de potencia instalada. En el ámbito industrial se refieren a minicentrales a las que tiene una potencia de inferior a 2 MW, microcentrales menores a 500KW y picocentrales menores a 10KW. (Paish, 2002).

Igualmente basándose en la capacidad de instalación las microcentrales se pueden clasificar en: (Departament of Alternative Energy Development and Efficiency, 2006).

- Micro-centrales con una capacidad de producción de menor a 200KW
- Pequeñas o mini – centrales con una capacidad de instalación entre 200 y 6000KW
- Medianas – centrales con una capacidad de producción entre 6000 y 20000KW
- Y grandes centrales con una capacidad de producción mayor a 20000KW

Para este trabajo se definieron las picocentrales hidroeléctricas como sistemas de generación de energía con capacidad hasta de 10KW, microcentrales entre 5 a 100KW y minicentrales 100 a 1000KW; las cuales, a partir de la energía del flujo de agua, sin necesidad de grandes represamientos, abastecen pequeños asentamientos humanos y tienen implementaciones en casi todo el mundo.

Con la generación de energía a partir de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), se busca dar suministro a zonas aisladas en las que llevar una línea de interconexión del sistema eléctrico principal

puede ser muy costoso, aunque también estas PCH pueden ser conectadas directamente a la red eléctrica principal si se sigue la regulación correspondiente.

2 ArcGis como una herramienta para la localización de lugares estratégicos para pico centrales

Los sistemas de información geográficas (SIG) son una herramienta computacional capaz de ensamblar, almacenar, manipular y desplegar información geográficamente referenciada. Estos se componen de subsistemas que le permiten hacer un procesamiento de imágenes satelitales o tipo raster. Igualmente tienen la capacidad para hacer análisis estadísticos de datos espaciales, manejo de base de datos y análisis geográficos

Los sistemas de información geográfica (SIG) son una herramienta muy útil en los procesos de toma de decisiones para la ubicación de recursos, ya que permiten hacer una recolección de gran cantidad de información, superponerla y procesarla; desarrollando modelos que permiten hacer un análisis e integrar los datos espaciales y no espaciales; con el fin de obtener un objetivo específico que dependa de esta información.

Para el caso específico del estudio de localización de microcentrales hidroeléctricas se requiere contar con muchos tipos de información correspondiente a diferentes mapas temáticos (ej. uso del suelo, zonas protegidas, topografía, geología, hidrología, etc.), que por lo general se encuentran a diferentes escalas. Mediante la herramienta del SIG, toda esta información se incorpora en forma digital con el mismo sistema de coordenadas, lo cual permite realizar todas esas superposiciones y operaciones de manera muy sencilla en poco tiempo, generando respuestas a una pregunta determinada generada por el diseñador del modelo. En este caso en específico delimita un área o un punto específico para la localización de un proyecto. Además, tiene una ventaja adicional de que todos los nuevos mapas resultados de este proceso, son generados automáticamente.

La información que se utiliza en los modelos de localización de microcentrales hidroeléctricas es vectorial del tipo punto, línea o polígono, como por ejemplo mapas de usos del suelo, curvas de nivel, delimitación de áreas de reserva, red vial, líneas de energía, etc. o de tipo raster (arreglo matricial de píxeles) tales como mapa de precipitación media anual, y el modelo digital de elevación. El modelo da como resultado un mapa en estos mismos formatos con la localización de los puntos donde posiblemente se pueden localizar los proyectos.

El proceso de localización de microcentrales hidroeléctricas se puede definir como la evaluación de variables que intervienen en la ubicación de este tipo de proyectos y que dan como resultados sitios tentativos con una adecuada evaluación del lugar. Por lo tanto, el análisis de ubicación para microcentrales se puede definir como el proceso de examen de lugares candidatos que se considere que tiene

menos obstáculos para el proyecto y que son más rentables en la etapa inicial del estudio (Sung Yi et al., 2010).

Para la identificación y evaluación de microcentrales o proyectos hidroeléctricos, es necesario analizar e interpretar un gran número de variables que están asociadas a cada proyecto, es por eso que es necesario recurrir a herramientas informáticas (SIG) que permitan superponer y unir toda la información de una forma estructurada. Los sistemas de información geográfica permiten hacer el almacenamiento de datos, el análisis y la administración de grandes volúmenes de información de una forma fácil.

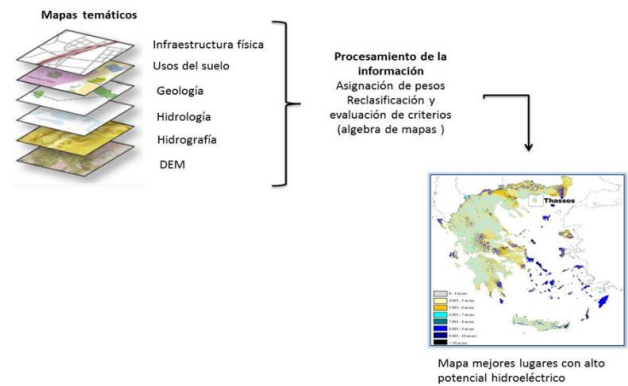


Figura 1. Esquema de la metodología para la localización de Microcentrales hidroeléctricas. Fuente: elaboración propia

3 Modelos y metodologías para la localización de microcentrales hidroeléctricas implementadas en ArcGis 9.3

Las metodologías que se discutirán en este documento están implementadas sobre el software ArcGis 9.3. Este software es uno de los más elaborados y utilizados en el campo de los sistemas de información geográfica, el cual permite; una manipulación y procesamiento de la información necesaria en la localización de microcentrales hidroeléctricas. Esta información está dada en formato vectorial (shp) y matricial (tif).

Las metodologías implementadas en esta herramienta SIG se basan en la identificación y evaluación de variables involucradas en un proceso de localización de proyectos hidroeléctricos. Éstas corresponden a un criterio utilizado para la cuantificación o calificación de los valores de los indicadores que permiten la evaluación de la viabilidad de proyectos de energía hidroeléctrica. (Alvarez, 2010)

Cada variable viene dada en forma de mapa o capa temática, a la cual se le asigna un peso o restricciones dependiendo del nivel de importancia en el proceso de selección. Estas capas se utilizan para el cálculo de los valores de los indicadores aplicando un álgebra de mapas (operaciones algebraicas con mapas), obteniendo así la identificación de los lugares estratégicos para la localización del proyecto tal como se muestra en la Figura 1. Por tal motivo el campo de aplicación y acción de estos modelos es muy amplio ya que cada proyecto en el mundo puede contar con criterios diferentes de evaluación dependiendo del interés que se tenga para él.

3.1 Experiencias en la aplicación de los SIG para la identificación de microcentrales hidroeléctricas

A continuación, se mencionarán algunos criterios y diagramas encontrados en la literatura sobre las metodologías para la localización de potenciales de energía para el desarrollo de microcentrales eléctricas mediante sistemas de información geográfica.

Metodología 1.

Propuesta por (Kusre et al., 2010) ver Figura 2.

Criterios de identificación:

1. Orden de la quebrada: solamente se aceptarán quebradas con un orden 5 o superior, esto con el fin de asegurar un caudal medio determinado para el proyecto.
2. Gradiente de elevación: el sitio seleccionado debe tener un gradiente del canal de 1:50 es decir como mínimo del 2%, con el fin de asegurar una cabeza de energía potencial.
3. La distancia mínima: la distancia mínima entre dos proyectos no puede ser menor a 500m

Metodología 2.

Igualmente, otro autor, (Sung Yi et al., 2010) propone agrupar las variables en dos grandes grupos, denominados como criterios de restricción y de ubicación. Ver Figura 3.

1. Restricción: se utilizan para excluir sitios indeseables que son legalmente restringidos o que pueden ser causa de conflictos (parques nacionales, suministros de agua de protección, instalaciones agrícolas, residenciales entre otros.)
2. Ubicación: los factores hidrológicos, topográficos, medio ambiente y ecológicos que se utilizan para calificar cada punto de la búsqueda se incluye con el fin de evaluar la idoneidad de una ubicación.

Metodología 3.

Para (Álvarez SM, 2010) la información se puede agrupar en tres grandes grupos relacionado con los objetivos principales del proceso de identificación y evaluación. Ver Figura 4.

- 3. Estimación del potencial de energía hidroeléctrica
- 4. Evaluación de los proyectos hidroeléctricos
- 5. Evaluación de los proyectos multipropósitos.

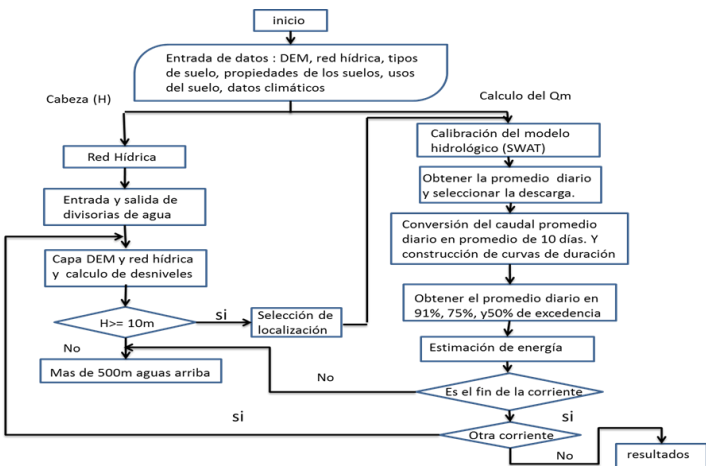


Figura 2. Diagrama de flujo para la localización de potenciales de energía hidroeléctrica, (Kusre et al., 2010)

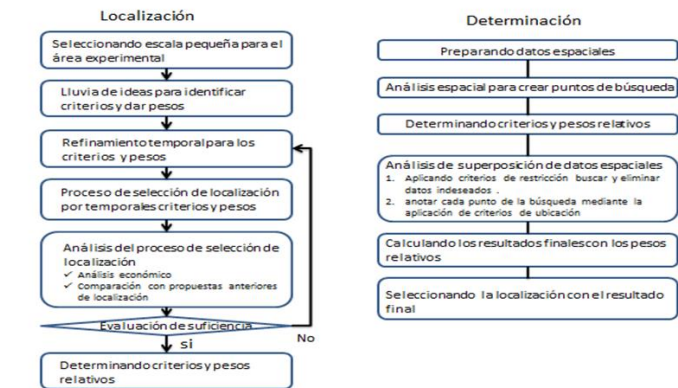


Figura 3. Metodología para (a) el proceso de análisis de localización, y (b) determinación de criterios y pesos relativos, para la ubicación de pequeñas centrales hidroeléctricas (Sung Yi et al., 2010).

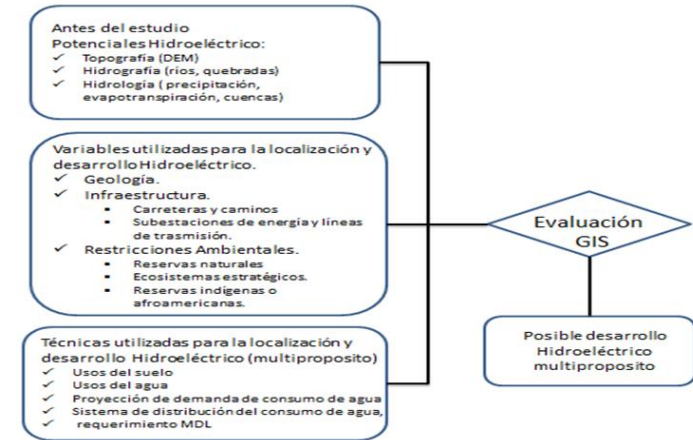


Figura 4. Metodología para la identificación de centrales hidroeléctricas multipropósito (Álvarez, 2010)

3.2 Análisis comparativo de los modelos

Como se puede inferir de los modelos revisados en este trabajo, en esencia tienen la misma estructura de evaluación basada en un análisis de selección multicriterio con pesos relativos donde se analizan un grupo de variables económicas, técnicas, y físicas de la región objeto del estudio. A continuación, se presenta un paralelo entre los tres modelos y las variables analizadas en cada uno de ellos.

Tabla 1. Paralelo entre las variables analizadas de cada modelo. Fuente: Elaboración Propia

Modelo 1. Presentado por (Kusre, et al, 2010)	Modelo 2. Presentado por (Sung Yi et al, 2010)	Modelo 3. Presentado por (Alvarez Santa Maria, 2010)
Variables y criterios considerados		
orden de las quebradas >5 (Qm)	localización	topografía
Gradiente de elevación > 2%	✓ reservas naturales	hidrografía
distancia mín. entre proyectos = 500m	✓ suministro s de agua	hidrología
*variables (usos y tipos de suelos, red hídrica, y MDT)	✓ instalaciones	geología
	✓ agricultura	infraestructura física
	Determinación pesos	reservas naturales
	✓ topografía	ecosistemas estratégicos
	✓ hidrología	reservas indígenas
	✓ medio ambiente	reservas afrodescendiente
	✓ ecología	

Como se puede observar en la Tabla 1 el modelo propuesto por (Kusre et al., 2010), es un modelo básico, donde solo se tienen en cuenta tres variables que definen la localización del proyecto. Estas variables garantizan un caudal medio para el proyecto, un desnivel y un distanciamiento mínimo para proyectos en cadena. Este modelo se podría utilizar para una identificación somera de los sitios estratégicos de localización más no definitivos, ya que no incluye variables ambientales y culturales que actualmente son muy importantes para cualquier proyecto de infraestructura. Igualmente, el criterio del orden de las quebradas es un criterio muy ambiguo ya que no se determina un caudal medio para cada proyecto.

Por el contrario, si comparamos los modelos propuestos por (Sung Yi et al., 2010) y (Álvarez, 2010) son muy similares las variables que analizan para la localización de los proyectos Ambos autores tiene en cuenta variables restrictivas tales como: reservas naturales, parques nacionales, suministros de agua, ecosistemas estratégicos, entre otros. Igualmente (Álvarez, 2010) incluye reservas indígenas y de afrodescendientes zonas importantes en Colombia y variables de ubicación tales como hidrología, topografía, infraestructura física, geología y usos del suelo. La gran diferencia entre ambos es la forma como hacen la evaluación económica y financiera del proyecto.

Definir cuál de los tres modelos analizados es el mejor no entra dentro de los objetivos de este documento, por lo tanto, no se hace un proceso de selección. Por el contrario, se propone una unión de los modelos y la adaptación para un caso colombiano.

El nuevo modelo propuesto de selección multicriterio para la localización de microcentrales hidroeléctricas tiene los criterios de selección en grupos afines, con el objetivo de facilitar el procesamiento de la información. Estos grupos se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Criterios que tengan compatibilidad con el medio ambiente.
- Compatibilidad con la situación económica, política, legislativa y financiera de la región (a nivel regional o país).
- Compatibilidad con la situación socio-económica.
- Consistencia con las condiciones técnicas de la zona de estudio y la tecnología disponible. (Mourmouris & Potolias, 2012)

A continuación, se desglosan cada uno de estos criterios en las variables o capas que incluye cada uno de los grupos.

Para ellos definiremos tres grupos en los cuales se agruparán las variables a utilizar, tal como se ilustra en la Figura 5:

1. De restricción:
 - a. Medio ambiental
 - Reservas naturales, parques nacionales, ecosistemas estratégicos
 - b. Socio económica
 - Reservas indígenas y de negritudes
 - Instalaciones agrícolas o residenciales
2. De ubicación:
 - DEM
 - Hidrografía
 - Hidrología
 - Infraestructura física
 - Geología
3. De Planificación:
 - Usos del suelo
 - Usos del agua

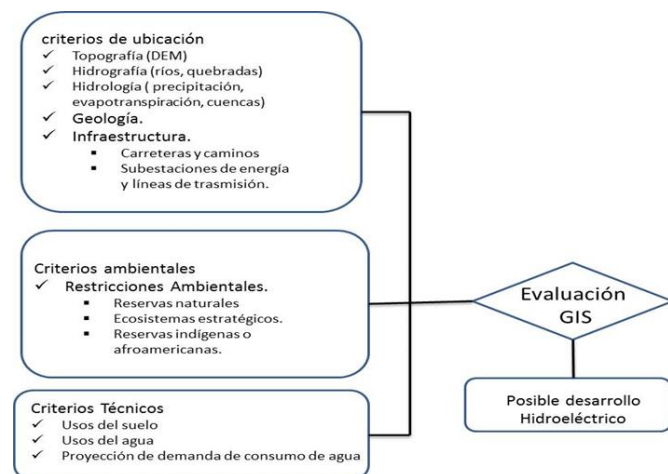


Figura 1. Diagrama de flujo para la localización de microcentrales hidroeléctricas propuesta. Fuente: Elaboración Propia

3.3 Descripción de las variables de evaluación

A continuación, se describen brevemente los criterios a utilizar en la modelación.

Criterios ambientales

Las microcentrales hidroeléctricas son una fuente de energía limpia, la cual contribuye a la mitigación de las emisiones de 6 gases de invernadero específicamente (CO₂, CH₄, N₂O, HFCS, PFCS y SF₆) los cuales tienen un impacto directo en la vida humana e indirecto en la sociedad, por este motivo los criterios ambientales dentro de la localización hacen parte esencial de la viabilidad del proyecto ya que contribuyen a la conservación de recursos naturales y zonas de protección. (Mourmouris & Potolias, 2012; citan a Loken et al., 2009).

Topografía o relieve: insumo esencial del modelo, se utiliza para estimar el potencial hidroeléctrico en una región. Esta información consiste en un mapa digital de elevación del terreno que permite estimar el delta de altura o cabeza potencial del río. Es una de las variables utilizadas para calcular la energía en un punto específico. El relieve o la topografía se pueden encontrar en formato vectorial o raster.

Hidrografía: para la localización de proyectos de microcentrales hidroeléctricas es de vital importancia conocer y tener un mapa de la red hídrica de la región estudiada que contenga la localización e identificación de las corrientes principales y secundarias de la zona.

Hidrología: Para conocer el potencial hidroeléctrico de un área específica es necesario conocer la distribución espacial de la precipitación media, la distribución real de la evapotranspiración y los parámetros morfométricos de las cuencas asociados a los puntos de interés.

Para conocer la distribución espacial de la precipitación media en una cuenca existen diferentes métodos para calcularla. Entre ellos se tiene el de curvas de duración IDF, mapas de precipitación e isoyetas.

A grandes rasgos, para la creación de un mapa de precipitación media, es calcular la precipitación media anual de cada una de las estaciones a partir de la mayor cantidad posible de datos de las estaciones de precipitación de la zona de evaluación. Con estos datos mediante una interpolación espacial de ellos, buscando el mejor interpolador, se genera un mapa de precipitación media de la cuenca.

Infraestructura física: consiste en toda la información de infraestructura física de la región estudiada (i.e.): líneas de alta tensión y de transmisión, caminos, carreteras, plantas de energía etc. Esta información está dada en un formato vectorial, a partir de ella se generarán restricciones para la localización de los puntos de interés.

Geología: conocer la geología de la zona donde se localizarán los proyectos es crucial en la viabilidad de un proyecto. Saber la estabilidad del terreno donde serán construidas la planta de generación de energía, la tubería de conducción la cual puede ser dañada por las fuerzas generadas por los movimientos y desplazamientos del suelo que suelen ocurrir en zonas inestables, y que pueden poner en peligro la seguridad del proyecto.

Usos del suelo: este criterio como su nombre lo indica tiene los diferentes usos del suelo que se presentan en una región o están proyectados, por lo tanto; es un insumo importante en el proceso de localización de proyectos de infraestructura ya que genera muchas de las restricciones de selección debido a que el paisaje circundante al desarrollo de un proyecto es fuertemente afectado por la ocupación del suelo. Para las microcentrales hidroeléctricas no hay zonas afectadas por la inundación de las presas por lo tanto el área de impacto es menor. El uso del suelo puede ser considerado también como un criterio social en la evaluación de sistemas de energía (Madlener et al., 2007).

Uno de los criterios que no se tiene en cuenta es el criterio social, el cual tiene mucha importancia en un proyecto de infraestructura ya que la opinión relativa que se tenga sobre él determina que tan fácil o no, será la construcción del proyecto respecto a la oposición de la comunidad. Que un proyecto sea socialmente aceptado o no va a garantizar que las obras de construcción se vean o no afectadas por la comunidad (Supriyasilp et al., 2009 cita a Almeida et al., 2005).

Como efecto colateral, la construcción de proyectos genera la creación de nuevos trabajos en la zona lo cual es un beneficio social para la comunidad. Esto hace que sea aceptado socialmente. Este criterio es extremadamente importante ya que de la opinión de la población y los grupos de presión pueden influir en gran medida en el tiempo de ejecución del proyecto. La aceptación social no es un criterio que se pueda cuantificar (Bakos et al., 2008).

Criterios económicos: hacen referencia a todo tipo de costos de inversión: que estén incluidos dentro del proyecto tanto en la etapa de diseño como en la etapa de construcción. Siempre se hace en valor presente neto e incluyen la compra de equipos, instalaciones, conducción a la central, construcción de vías, servicios de ingeniería, imprevistos de trabajo y autorizaciones legislativas entre otros. La investigación de costos dentro de un proyecto se vuelve uno de los criterios más usados en la toma de decisiones finales en los proyectos de generación de energía (Afgan & Carvalho, 2002).

3.4 Pesos y restricciones

3.4.1 Energía potencial:

Se da mayor importancia a los lugares de alta energía potencial con el fin de disminuir el tamaño del equipo y la infraestructura (planta de energía y unidades de generación). Se asigna un grado de manera proporcional a cada proyecto identificado de acuerdo con el valor de su correspondiente potencial de energía o capacidad instalada estimada. La mejor nota es de 5 y se le da al proyecto con el potencial de poder más alto estimado. La peor nota es una 1, asignada al proyecto con la menor capacidad instalada estimada. La calificación correspondiente a los otros proyectos se da como porcentaje de los valores potenciales de mayor y menor potencia.

3.4.2 Geología:

Este es un criterio esencial para determinar la estabilidad de los desarrollos hidroeléctricos. Los proyectos ubicados en las fallas geológicas son eliminados.

3.4.3 Zonas protegidas:

Estas zonas se pueden dividir en tres grupos de acuerdo con el tipo de restricción asociada a cada una. Los indicadores de evaluación basados en estos criterios se describen en los numerales siguientes.

- Reservas naturales: en estas áreas, se consideran las especies endémicas, no sólo animales, sino también vegetales. Estas zonas están restringidas para cualquier intervención humana por su relevancia en la biodiversidad nacional. Debido a eso, los proyectos localizados en estas áreas son descartados.
- Ecosistemas estratégicos: son los ecosistemas que son importantes para el país por ciertas características, como zonas madereras y agrícolas especiales. Los proyectos ubicados en estas áreas son penalizados asignándoles un valor de 0 en este indicador con el fin de disminuir su valoración en el proceso de evaluación. Los proyectos ubicados fuera de estas zonas pueden obtener un valor de 1 para este indicador.
- Reservaciones indígenas y de negritudes: las zonas designadas para el resguardo de las comunidades especiales y los grupos étnicos son considerados intocables por tanto el desarrollo de cualquier proyecto, especialmente los relacionados con infraestructura. Por ello, los proyectos localizados en estas áreas son descartados.

3.4.4 Longitud de las carreteras de acceso:

Los proyectos que necesitan más de 1 km de longitud para construir una carretera se consideran no viables. Es muy difícil establecer un criterio para la evaluación de proyectos de energía hidroeléctrica en términos de sus vías de acceso, ya que cada proyecto es único y por ello diferentes consideraciones deben tenerse en cuenta para determinar su viabilidad. La situación ideal para desarrollos pequeños (con una potencia instalada en 20 KW) es que estos proyectos no requieran la construcción de caminos de acceso, es decir, los inversionistas y los diseñadores siempre buscan longitudes mínimas posibles de las carreteras que se construyen. En el caso de los pequeños desarrollos hidroeléctricos y de acuerdo con la experiencia del personal calificado, la longitud máxima de los caminos que pueden considerarse viables en un proyecto es del orden de hasta 2 km. Los proyectos con una distancia superior a 2 km de una carretera, camino, o ruta de acceso son descartados. Esta distancia se mide por medio de un círculo (buffer) con un radio de 2 km, que se coloca en el sitio de cada proyecto. (Álvarez, 2010).

3.4.5 Longitud de líneas de transmisión:

Así como ocurre con las vías de acceso, la situación ideal es alcanzar la longitud mínima de las líneas de transmisión para la conexión de pequeños desarrollos hidroeléctricos a la red nacional. Según el criterio de los expertos, la longitud máxima de las líneas de transmisión puede ser del orden de 15 km a 20 km. Los proyectos con una longitud superior a 20 km de cualquier subestación o línea de transmisión son descartados. Esta distancia se mide de la misma manera que las vías de acceso.

3.5 Análisis multicriterio

Las metodologías que se expusieron en este documento y la que se propone realizar, están basadas en metodologías de análisis multicriterio. El análisis multicriterio es un proceso de aprendizaje continuo y cíclico, que comienza con un análisis del contexto de decisión, pasa por definir los diferentes elementos del modelo de evaluación y retorna a las fases iniciales hasta que se logre definir una estructura de evaluación estable que produzca tranquilidad al evaluador. El resultado final del análisis es una valoración numérica de las opciones, lo cual permite tomar una decisión con tranquilidad de poder justificarla tanto cualitativa como cuantitativamente. Al cabo del análisis se pueden explicar, en detalle, las razones de la elección.

4 Caso aplicativo valle de aburra

Con el fin de implementar la metodología expuesta en este documento se toman como caso aplicativo tres cuencas pertenecientes al valle de aburra asociadas a las quebradas La Iguaña, Santa Elena y La García (Figura 6). Este ejemplo busca recrear el modelo de una forma real, aunque con algunas omisiones ya que las zonas a intervenir pueden ser muy pobladas, en ese caso los lugares de localización quedarían descartados inmediatamente.

Como punto de partida se busca localizar un proyecto para una microcentral hidroeléctrica en alguna de estas tres cuencas que sea capaz de generar 2 MW de potencia y con el menor impacto ambiental. El modelo se desarrolló con información georreferenciada obtenida del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Aburra (POMCA).

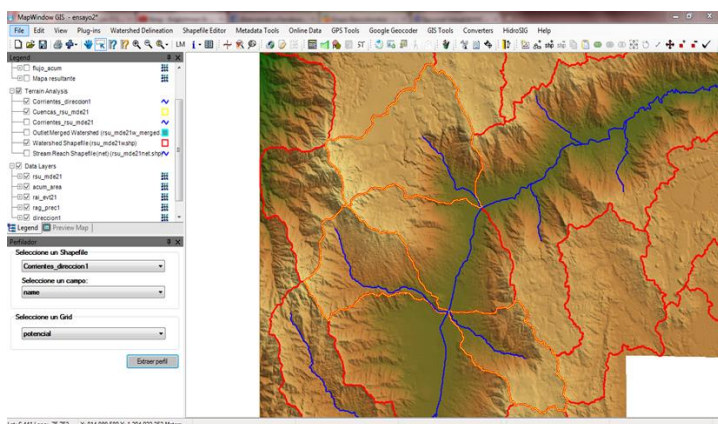


Figura 6 Modelo de elevación digital de una porción del Valle de Aburrá, red de drenaje y cuencas generales. Fuente: Elaboración Propia.

4.1 Obtención de potencial hidroeléctrico

Como primer paso en la selección de la mejor ubicación de microcentrales hidroeléctricas, se debe calcular el mapa de potencial hidroeléctrico debido a que es una de las variables más importantes en el proceso de selección y un insumo difícil de conseguir; por lo

tanto, se debe construir a partir de los mapas de precipitación media, evapotranspiración y el modelo de elevación digital.

En este documento se utilizó para la estimación del potencial de energía hidroeléctrica el software Hydrosig aplicado a la región de estudio. Este software es una extensión del Sistema de Información Geográfico MapWindow, que permite realizar estimaciones y análisis de variables hidrológicas, climáticas y geomorfológicas para la planificación y cuantificación del recurso hídrico. Hydrosig es desarrollado por investigadores pertenecientes a la Escuela de Geociencias y Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

Para estimar el potencial hidroeléctrico en Hydrosig se procede la siguiente forma:

- A partir de un modelo de elevación digital de la zona de estudio (MDT), se crea un mapa de direcciones; utilizando la herramienta Watershed Delineation. Esta herramienta genera una serie de mapas entre los cuales tenemos el de las cuencas generales de la zona, de las corrientes principales y el mapa de direcciones; el cual muestra la trayectoria seguida por el agua en las cuencas que están ubicadas en el área de estudio. Figura 7.
- En el cálculo del caudal medio de las cuencas de interés, se utiliza el mapa de precipitación media y la herramienta de Hydrosig que calcula la acumulación de flujo sobre cada pixel por medio del mapa de precipitaciones, direcciones de flujo y las pérdidas por evapotranspiración.
- Para estimar la cabeza hidráulica del río o quebrada a evaluar, se seleccionan las cuencas sobre las que se va a realizar el estudio y se obtiene la cota en los extremos de ellas. La cabeza hidráulica o delta de altura se estima respecto al punto más bajo de la cuenca, por lo tanto, al mapa de elevación digital se le resta esta cota.

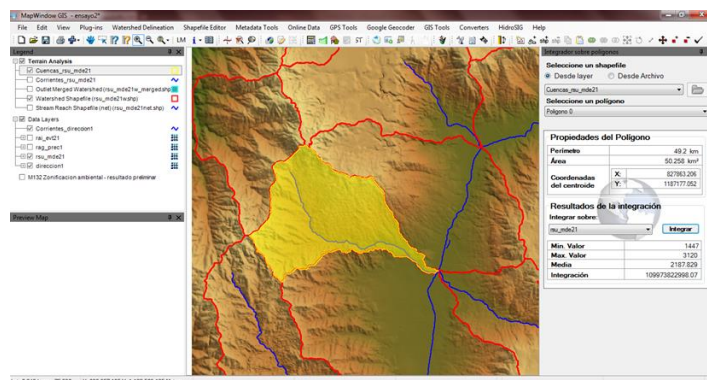


Figura 7 Cuenca seleccionada con los parámetros morfométricos. Fuente: Elaboración Propia

Ya obtenidos todos los parámetros se procede a calcular el potencial hidroeléctrico de la cuenca seleccionada, el cual se obtiene de la siguiente ecuación 1:

$$P = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (\text{Ecuación 1})$$

En donde

- P : Potencial en MW
 γ : Peso específico del agua
 H : Cabeza hidráulica en m

El mapa de potencial hidroeléctrico se obtiene mediante álgebra de mapas aplicando la fórmula de potencia, utilizando los mapas de flujo acumulado (caudales medios), delta de elevación (H) y una constante $9,810 \text{ N/m}^3$.

Para tener una visualización de las variables analizadas para la construcción de potencial de energía, se construye un vector de puntos a lo largo del eje del río, espaciados una distancia conveniente según el diseñador lo considere, para estimar el potencial de energía en estos puntos. Las variables asociadas a cada uno de estos puntos se calculan a partir de la herramienta de muestreo de MapWindow y el mapa que corresponda a la variable.

A este vector se le asocian los atributos del mapa de potencial, de cabeza hidráulica y caudal medio y se hace una gráfica comparativa de estas tres variables a lo largo del eje del cauce con el fin de obtener la abscisa donde posiblemente se puede ubicar el proyecto tal como se ejemplifica en la Figura 8.

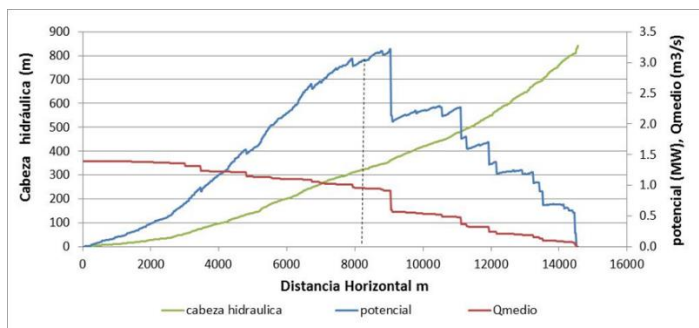


Figura 8 Perfiles de algunas variables sobre el eje una de las quebradas seleccionada para el estudio de localización de una microcentral. Fuente: Elaboración Propia

De la Figura 8 se puede concluir que un buen lugar para la localización de la microcentral en esta quebrada está entre el kilómetro 8 y 9 aproximadamente, en la mitad de la quebrada. Los perfiles correspondientes a las otras quebradas analizadas no fueron incluidos en este informe con el objetivo de reducir los gráficos y los cálculos detallados en el estudio.

4.2 Modelo model builder

Obtenido el mapa de potencial hidroeléctrico se procede a realizar el modelo para la selección de los mejores lugares para la localización de microcentrales hidroeléctricas incorporando los criterios antes expuestos. Este modelo se hizo en su gran mayoría con el software ArcGIS utilizando la aplicación Model Builder (Figura 9).

Model Builder es una herramienta de análisis que se incluye con ArcGIS Desktop que permite crear, editar, gestionar modelos y automatizar flujos de trabajo repetitivos. Se usa estandarizando

procesos complejos que toman gran cantidad de tiempo en procesamiento.

En la implementación del modelo en ModelBuilder se utiliza la información cartografía del valle de aburra, se genera una serie de mapas de cada variable y se estandarizan con el fin de poder hacer el álgebra de mapa y obtener las zonas donde debe estar ubicada las microcentrales.

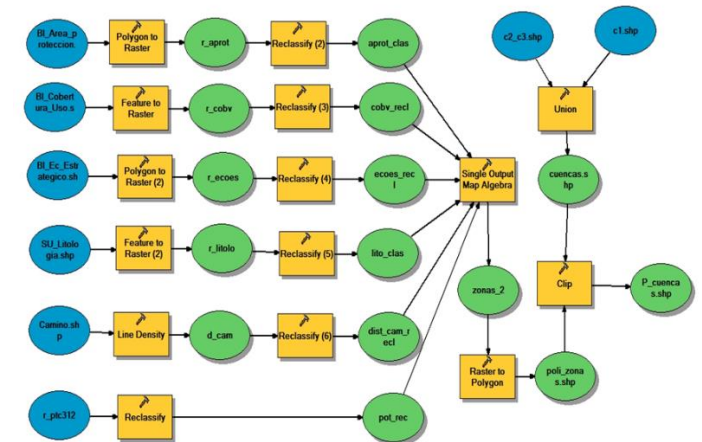


Figura 9. Esquema modelo localización de microcentrales hidroeléctricas ModelBuilder. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 9. Se presenta el esquema del modelo desarrollado en Model Builder, se puede observar que la parte de cartografía inicia desde los archivos shp básicos obtenidos del POMCA: cobertura del suelo, áreas protegidas, ecosistemas estratégicos, red vial y las variables hidrológicas resultantes de los raster generados en el programa Mapwindows, a los cuales se les debió cambiar de formato ya que ambos programas no comparten el mismo tipo de archivos para los raster.

En la Figura 10. Se presenta el mapa con los mejores cuatro lugares donde se puede localizar la microcentral hidroeléctrica con una capacidad de 3KW, obtenidos mediante el análisis expuesto en este documento. Como se puede observar estos lugares no quedan sobre ecosistemas estratégicos y áreas protegidas ya que estas se descartan inmediatamente debido a las condiciones que se imponen en el modelo multicriterio.

De la Tabla 2 se puede concluir que el mejor lugar para la microcentral corresponde al sitio 1 con una calificación de 54 puntos, ubicado sobre la cuenca Santa Elena. Por estar muy cerca de las reservas se descarta y queda como la mejor ubicación el sitio 2 sobre la quebrada La Iguaná, localizado aproximadamente en la mitad de la longitud del cauce.

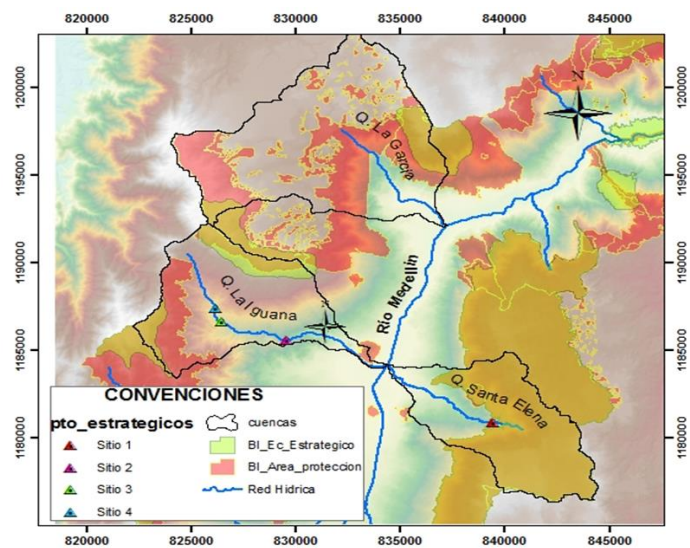


Figura 10. Mapa de localización de zonas óptimas para la localización de microcentrales hidroeléctricas. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 2. Localización puntos estratégicos para proyectos de microcentrales. Fuente: Elaboración Propia.

nombre	coordenadas		calificación	cuenca
	Este	Norte		
Sitio 4	826151.218	1187456.639	46	La Iguana
Sitio 3	826434.924	1186652.806	48	La Iguana
Sitio 2	829536.774	1185612.551	53	La Iguana
Sitio 1	839406.969	1180925.988	54	Santa Elena

5 Conclusiones

Las conclusiones de este estudio se pueden clasificar en dos categorías: las relacionadas con la comparación de las diferentes metodologías expuestas en el documento y las que se refieren al caso aplicado como tal. En los numerales siguientes se exponen estas conclusiones.

5.1 Sobre las metodologías referenciadas

- La definición de una metodología para la identificación y evaluación de los lugares para proyectos de microcentrales hidroeléctricas es un paso adelante para mejorar la eficiencia en el proceso de identificar y establecer las variables en este tipo de proyectos.
- Las metodologías para la localización de proyectos de microcentrales hidroeléctricas o en general de proyectos de infraestructura puede hacerse tan detallado como el diseñador quiera. Todo depende de la información que se encuentre disponible para este fin, por lo tanto, se deben priorizar criterios que nunca deben faltar.
- La utilización de diferentes programas de Geomática suele ser un proceso muy utilizado en este tipo de proyectos, debido a que

algunos programas son especializados en el manejo de cierto tipo de información como en el caso de las variables hidrológicas en HidroSIG, lo importante es que todos estos programas logran trabajar con formatos de archivos comunes lo que hace que se puedan combinar.

- Las herramientas SIG desarrolladas permiten la realización de análisis dirigidos a establecer prioridades para la ejecución de un proyecto de microcentrales hidroeléctrica, con el fin de utilizar los recursos hídricos y del medio ambiente de una manera eficiente.
- Tener información sobre desarrollos hidroeléctricos sobre algunas corrientes, es de gran utilidad a la hora de identificar puntos en los cauces para la localización de estos proyectos ya que se ahorra tiempo y esfuerzo en la búsqueda de cuencas potencialmente aptas.
- El criterio relativo a la longitud de las líneas de transmisión no es muy confiable; debido a la falta de información sobre la ubicación de las subestaciones eléctricas y líneas de transmisión de alta capacidad en las áreas de interés. Es importante tener en cuenta que esta información es muy difícil de conseguir ya que se considera estratégica y confidencial por razones de seguridad.
- La utilización de una buena cartografía es de gran importancia para este tipo de estudio, la utilización de un DEM de resolución de 30 m es adecuado para este tipo de estudios considerando el alcance definido y objetivo principal.
- La implementación de este tipo de modelos se debe hacer en zonas donde se tenga una buena información cartográfica, de lo contrario los costos del estudio se pueden elevar y el tiempo en el que se implementa debido a la construcción de toda la cartografía base puede prolongarse.
- La utilización de fotografías aéreas e imágenes satelitales puede ser una buena opción para la obtención de algunas variables en el caso de que no se cuente con ellas.

Un factor muy importante en la viabilidad de los proyectos hidroeléctricos es el costo de la energía, ya que éste afecta a los criterios de evaluación relacionados con las longitudes máximas de los caminos de acceso y de las líneas de transmisión. En Colombia, la energía es relativamente barata y es por esto que los costos mínimos de inversión en líneas de transmisión podrían estar garantizada.

Los pesos de las variables para los modelos de localización de microcentrales hidroeléctricas no se pueden estandarizar ya que los criterios de evaluación varían de acuerdo con la región de estudio, con el grupo de trabajo que diseña y con los objetivos de cada proyecto.

5.2 Sobre el caso de estudio

- El software Hydrosig es una herramienta eficiente para el cálculo de las variables hidrológicas que se deben tener en la cuenta para la obtención del mapa de potencial hidroeléctrico, además de que es un software libre fácil de utilizar.
- De las tres cuencas analizadas, la que tiene el mayor potencial hidroeléctrico corresponde a la cuenca de la quebrada La

Iguaná, con un área de 37,45 km², un caudal medio en el sitio del proyecto de 1,101 m³/s y un potencial de 2,22 KW.

- De los perfiles comparados de las variables caudal medio, potencia y cabeza hidráulica; podemos identificar claramente la abscisa donde se localiza el mayor potencial hidroeléctrico. Este lugar corresponde a un equilibrio entre el caudal medio de la zona, el área de la cuenca y la cabeza hidráulica ya que el potencial es proporcional a estas variables.
- En la Figura 10 se pueden ver claramente los puntos donde se deben localizar las microcentrales según el modelo que se propuso en este documento.

6 Recomendaciones

- Es necesario hacer consideraciones adicionales para el establecimiento de criterios de evaluación para identificar pequeños desarrollos hidroeléctricos. Uno de estos aspectos es la naturaleza del proyecto. Si es privado, los indicadores económicos son más relevantes, de allí la importancia de evaluar el procedimiento para disminuir del costo de la construcción de los caminos de acceso y líneas de transmisión. Mientras que en los proyectos públicos se pondera más el beneficio social de la obra que las utilidades del proyecto, con el objetivo de garantizando el suministro de energía a la población. (Álvarez, 2010). Hoy en día, en Colombia la mayoría de los proyectos hidroeléctricos son privadas y es por eso que su viabilidad se basa en buenos indicadores financieros y económicos.
- La calidad del agua es un tema muy importante a tener en cuenta durante el análisis de proyectos multiobjetivos, debido a que los costos de tratamiento lo pueden hacer inviable, especialmente en el caso de los proyectos hidroeléctricos pequeños. Por esta razón, es recomendable tomar el agua, aguas arriba del depósito o después del proceso de generación de energía, en busca de una mejor calidad de agua (sin sólidos suspendidos) disminuyendo de esta manera, los costos asociados a la producción de agua potable.
- Las características de las subestaciones de energía, tales como capacidad, el tamaño, el material de aislamiento necesario, etc. deben tenerse en cuenta para la identificación de posibles desarrollos hidroeléctricos.
- Si la capacidad de la línea de transmisión se debe aumentar, los costos del proyecto también aumentan.

7 Bibliografía

Afgan, N. H., & Carvalho, M. G. (2002). Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants. *Energy*, 739-755.

Alvarez Santa Maria, L. M. (2010). Development of Geographic Information System for Identifying Multipurpose Hydropower Projects. Case Study: Department of Antioquia, Colombia.

Arévalo, D., Lozano, J., & Sabogal, J. (2011). Estudio Nacional de Huella Hídrica Colombia Sector Agrícola. sostenibilidad, Tecnología y Humanismo.

Bakos, G. C.; Tsioliariidou, E.; Potolias, C. (2008). Technoeconomic assessment and strategic analysis of heat and Power cogeneration (CHP) from biomass in Greece. *Biomass and Bioenergy* 32, 558-567.

Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2006). The small hydropower project development in thailand. Bangkok. Ministry of science technology and environment.

Diez, J. M., & Olmeda, S. S. (Julio de 2008). Diseño Eco-Hidrológico de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas Evaluación de Caudales Ecológicos. *Revista Energética*, 39, 65-76.

Francois Cyr, J., Landry, M., & Gagnon, Y. (2011). methodology for the large scale assessment of small hydroelectric potential: Application to the province of New Brunswick (Canada). *Renewable Energy*, 2940-2950.

IDEAM. (2010). Estudio Nacional del Agua. Bogota D.C.

Kusre, B. C.; Baruah, D. C.; Bordoloi, P. k.; Patra, S. C. (2010). Assessment of hydropower potential using GIS and hydrological modeling and technique in Kopili River basin in Assam (India). *Applie Energy*, 298-309.

Lea, K. (2008). The potential of water power in the fight against global warming in the US. *Energy Policy*, 3252-3265.

Madlener, R., Kowalski, K., & Stagl, S. (2007). New ways for the integrated appraisal of national energy scenarios: the case of renewable energy use in Austria. *Energy Policy*, 6060-6074.

Ministerio de Educacion Nacional de Colombia. (s.f.). Colombia una potencia en energía alternativa. Recuperado el 27 de 8 de 2012, de www.mineduacion.gov.co: <http://www.mineduacion.gov.co/cvn/1665/article-117028.html>

Ministerio de Minas y Energía. (s.f.). Sector Energía Eléctrica. Recuperado el 24 de 9 de 2012, de www.minminas.gov.co: http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/Memorias/Memorias_2011/05-ENERGIA.pdf

Mourmouris, J. C., & Potolias, C. (2012). A multi-criteria methodology for energy planning and developing renewable energy sources at a regional level: A case study thassos, Greece. *Energy Policy*(<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.074>).

Obando, P. E. (25 de Julio de 2012). ' Vientos de energia ': Una slucion al problema energético en colombia. *El Espectador*, pág. 4B.

Paish, O. (2002). Small Hydro power:technology and currensnt status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6, 537-556.

Pannathat, R., Taweeep, C., & Thawilwadee, B. (2009). 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*, 2336-2348.

Serhat, K., & Kemal, B. (2009). Assessment of small hydropower (SHP) development in Turkey: Laws, regulations and EU policy perspective. *Energy Policy*, 3872-3879.

Sung Yi, C., Hee lee, J., & Pil Shim, M. (2010). Site location analysis for small hydropower using geo-spatial information system. *Rebewabke Energy*, 35, 852-861.

Supriyasilp, T., Pongput, K., & Boonyasirikul, T. (2009). Hydropower development priority using MCDM method. *Energy Policy*, 37, 1866-1875.

UPME, Unidad de planeacion minero energetica. (s.f.). Energia Renovable Descripcion, Tecnologia y usos finale. Recuperado el 7 de 8 de 2012, de www.upme.gov.co: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Iluminacion/CarFNCE.pdf>