



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Modelo basado en sistemas expertos para determinar la óptima localización de proyectos hidroeléctricos con potencias menores a 100 MW.

Carlos Andrés Capachero Martínez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía
Bogotá, Colombia
2018

Modelo basado en sistemas expertos para determinar la óptima localización de proyectos hidroeléctricos con potencias menores a 100 MW.

Carlos Andrés Capachero Martínez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Geomática

Director:

IC., MsC., Ph.D., Nelson Obregón Neira

Codirector:

MsC. Luis Joel Martínez Martínez

Línea de Investigación:

Tecnologías Geoespaciales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía

Bogotá, Colombia

2018

A mis padres (Q.E.P.D), que con su sacrificio me brindaron las herramientas para alcanzar las metas propuestas, a mi hija Gabriela que es hoy mi principal motivo, a mis hermanos que son mis apoyos incondicionales.

Resumen

El propósito de este trabajo de investigación es el desarrollo de un modelo basado en sistemas expertos para identificación óptima de proyectos hidroeléctricos con potencias menores a 100 MW. El modelo incorpora una etapa de adquisición de conocimientos, el diseño de un aplicativo SIG para el tratamiento semi automatizado de los insumos y una evaluación de desempeño del modelo desarrollado, en zonas del territorio colombiano que actualmente cuentan con estudios o proyectos hidroeléctricos de pequeña escala. El modelo identificó el 21% de los proyectos o desarrollos actuales específicamente aquellos con potencias mayores a 500 KW y, aunque presenta limitaciones en zonas con pendiente monótona estima el potencial teórico e identifica de manera satisfactoria desniveles y sitios óptimos para desarrollo de proyectos hidroeléctricos en terrenos rugosos.

Palabras clave: Modelo, Sistema Experto, Sistemas de Información Geográfica, Hidroeléctricas, Potencia.

Abstract

The purpose of this research work is the development of a model based on expert systems for the identification of hydroelectric projects with powers of less than 100 MW. The model incorporates a stage of knowledge acquisition, the design of a GIS for the semi-automated treatment of inputs and an evaluation of the performance of the model developed in areas of Colombian territory that currently has studies or small-scale hydroelectric projects. The model identified 21% of the current projects, specifically those with powers greater than 500 KW and, although it has limitations in areas with a monotonous slope, it estimates the theoretical potential and identifies in a satisfactory manner height difference and optimal sites for the development of hydroelectric projects in rough terrain.

Keywords: Model, Expert System, Geographic Information System, hydroelectric, Power.

Contenido

Introducción	10
Objetivos	13
Objetivo General	13
Objetivos Específicos	13
1. Revisión de literatura.....	15
1.1. Hidroenergía	15
1.1.1. Centrales hidroeléctricas	15
1.1.2. Pequeños aprovechamientos hidroeléctricos: panorama mundial y nacional	18
1.2. Potencial hidroeléctrico	21
1.2.1. Principios para la estimación de la potencia	22
1.2.2. Estimación del caudal.....	22
1.2.3. Estimación del salto	24
1.2.4. Métodos y modelos para la estimación del potencial hidroeléctrico	25
1.2.5. Aplicaciones tecnológicas para la identificación de sitios óptimos	27
1.2.6. Otras consideraciones.....	29
1.3. Sistemas expertos	30
2. Materiales y Métodos.....	33
2.1. Materiales	33
2.2. Metodología	33
2.2.1. Consulta a expertos y fuentes secundarias	33
2.2.2. Extracción de conocimiento de las bases de datos	35
2.2.3. Modelo conceptual y matemático, prototipo del aplicativo	36
3. Resultados y discusión	37
3.1. Desarrollo del modelo	37
3.1.1. Deducción de reglas.....	37
3.1.2. Modelo conceptual	47
3.2. Diseño del aplicativo	48
3.3. Evaluación de desempeño del modelo.....	55
4. Conclusiones	60
Anexo A - Matriz de evaluación de alternativas	62
Anexo B - Inventario de proyectos ESSE	62
Anexo C - Resultados algoritmos evolutivos.....	62
Anexo D - Modelo_Potencial_V.2.tbx.....	62
Bibliografía	63

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Esquema típico de aprovechamiento de una PCH (Alfaro, 2014)	19
Figura 1-2: Hidrograma y Curva de Duración de Caudales típicos de una estación de aforo (Scnitzer, 2009)	22
Figura 1-3: Esquema metodológico de la regionalización áreas hidrográficas (Pontificia Universidad Javeriana, 2015)	23
Figura 1-4: Cabeza hidráulica o caída bruta (Scnitzer, 2009)	24
Figura 3-1: Estructura jerárquica para la identificación de sitios óptimos.	39
Figura 3-2: Modelo conceptual identificación de sitios óptimos.....	47
Figura 3-3: Esquema de segmentación de drenajes, traslape de estructuras.....	51
Figura 3-4: Desarrollos identificados en el ESSE y suministrados por la UPME.	56
Figura 3-5: Sitios identificados por el modelo coincidentes con los proyectos de referencia.	57

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Valores asignados a algunas variables por diferentes autores.....	19
Tabla 3-1: Calidad de las reglas por algoritmo para captaciones, datos ESSE.	42
Tabla 3-2: Calidad de las reglas por algoritmo para casas de máquinas, datos ESSE. ..	43
Tabla 3-3: Calidad de las reglas por algoritmo para captaciones, datos UPME.	43
Tabla 3-4: Calidad de las reglas por algoritmo para casas de máquina, datos UPME. ...	44
Tabla 3-5: Reglas generadas para la selección de sitios óptimos.....	45
Tabla 3-6: Salidas del modelo y relación con proyectos existentes.....	55
Tabla 3-7: Sitios identificados por el modelo en función de la potencia teórica con longitud de conducción de 1 km.....	58
Tabla 3-8: Sitios identificados por el modelo en función de la potencia teórica con longitud de conducción de 2.5 km.....	59
Tabla 3-9: Sitios identificados por el modelo en función de la potencia teórica con longitud de conducción de 5 km.....	59

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
P	Potencia	kW
kW	Kilovatio	W
MW	Megavatio	W
L	Longitud de conducción	km
H	Salto hidráulico	m
$Estr$	Estrechamiento	-
Q	Caudal	m^3/s
Q_{95}	Caudal con probabilidad de excedencia del 95%	m^3/s
Q_d	Caudal de diseño	m^3/s
η	Eficiencia de la turbina	%
γ	Gravedad específica	N/ m^3
h	Altura de salto	m
V	Volumen	m^3

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>ENA</i>	Estudio Nacional del Agua
<i>ESSE</i>	Estudio del Sector Eléctrico
<i>PCH</i>	Pequeñas Centrales Hidroeléctricas
<i>RAC</i>	Regla de asociación cuantitativa
<i>SIG</i>	Sistemas de Información Geográfica
<i>SIN</i>	Sistema Interconectado Nacional
<i>UPME</i>	Unidad de Planeación Minero Energética

Introducción

El desarrollo y optimización de las actividades del hombre desde los inicios de la civilización ha estado íntimamente relacionado con la energía (Mishra, Singal, & Khatod, 2011). Algunos momentos históricos para significar esta relación se encuentran ampliamente documentados desde diferentes enfoques, pero siempre identificando como factor común, una etapa agrícola donde predominan las fuentes de energía de tracción humana y animal, el uso del viento en navegación, el arado, la herradura y otras herramientas que en combinación con el hierro hicieron posible el talado de bosques y el uso intensivo de madera para embarcaciones, y una etapa industrial caracterizada por los grandes inventos, por mencionar algunos como la máquina de vapor, la máquina de hilar, la bobina y la segunda máquina de Watt (Cunningham, 2003).

A partir de estos momentos y específicamente desde la Revolución Industrial, la sociedad ha mostrado un alto grado de dependencia con la energía derivada de las fuentes fósiles, lo que consecuentemente ha agudizado la problemática ambiental e impactado la economía mundial, dada la incertidumbre sobre el agotamiento de las fuentes de energía convencionales (Gopal *et al.*, 2013). En este sentido el aprovechamiento de pequeña escala del recurso hídrico en movimiento se consolida como una entre tantas fuentes alternativas de energía eléctrica, cuya característica de bajo impacto ambiental y de fácil instalación en zonas de acceso limitado hacen que sea vista como uno de los más atractivos mecanismos de sustitución de los combustibles fósiles.

Esta fuente de energía ha sido ampliamente estudiada a nivel mundial y se han desarrollado herramientas y metodologías basadas en el procesamiento de datos espaciales para identificar sitios con aptitud para el desarrollo de plantas hidroeléctricas. En el contexto nacional se identifican trabajos importantes aunque no propiamente algoritmos o modelos de código abierto para identificar proyectos hidroeléctricos; estos

trabajos están orientados principalmente a la gestión de las entidades reguladoras y de planificación, tales como el Estudio del Sector de Energía Eléctrica (ISA, 1979), el Atlas de Radiación Solar (UPME, 2005), el Atlas de Viento y Energía Eólica (UPME, 2006), el Atlas de Potencial Energético de la Biomasa Residual (UPME, 2010) y la primera aproximación al potencial hidroenergético utilizando una plataforma SIG en el año 2007. La Unidad de Planeación Minero Energética - UPME; entidad adscrita al Ministerio de Minas y Energía, dentro de su política de planeación, las directrices nacionales y en el marco jurídico de las Leyes 143 de 1994 y 697 de 2001, busca llegar a una aproximación más detallada y actualizada que los estudios mencionados, con el propósito de fortalecer la gestión y sus objetivos misionales. Este proceso se llevó a cabo por parte del Instituto Geofísico de la Pontificia Universidad Javeriana, que participó en la convocatoria 558-2012 con el proyecto denominado Evaluación del Potencial Hidroenergético de Colombia, dentro del cual se enmarca esta tesis de investigación.

El proyecto surge de la necesidad principalmente de la UPME de superar ciertas limitantes de carácter técnico que restringen el adecuado ejercicio de sus funciones, algunos de estos aspectos tiene que ver con la ausencia de herramientas de referencia con un adecuado nivel de detalle y basada en información hidrológica confiable que permita validar la información aportada por los promotores, adicionalmente predominan elementos metodológicos, teóricos y conceptuales incompletos o que no satisfacen totalmente los requerimientos técnicos de esta entidad y la de los organismos de regulación y control como las Corporaciones Autónomas Regionales. Sin embargo, la problemática también se extiende a los promotores de plantas menores, los cuales no cuentan con insumos, métodos estandarizados o herramientas de bajo costo que faciliten el desarrollo de estas iniciativas cuya importancia principal radica en su potencialidad para mejorar la firmeza del Sistema Nacional y la capacidad de implementarse de manera mucho más flexible que los megaproyectos (UPME, 2003).

En virtud de esta problemática identificada, se desarrolla en esta tesis de investigación, un modelo basado en sistemas expertos que incorpora el concepto de identificación de sitios óptimos para el desarrollo de proyectos hidroeléctricos con potencias menores a 100 MW. Para el efecto se consideran como insumos un conjunto datos espaciales, bases teóricas y criterios de experto que permitirá formalizar los mecanismos de razonamiento empleados en la etapa de reconocimiento y aplicarlos a datos espaciales

de acceso libre, contando de esta manera con múltiples reglas de asociación deducidas y evaluadas con algoritmos evolutivos. Asimismo, relacionar la escala de los insumos empleados con el tipo de desarrollo hidroeléctrico identificado por el modelo en función de la potencia teórica, aspectos estos no desarrollados hasta el momento en los modelos empleados y consultados en el ámbito académico. Finalmente, los productos de la investigación están orientados principalmente a los promotores de pequeños proyectos hidroeléctricos con miras a fomentar estas iniciativas de gran impacto para el desarrollo del país, reducir el costo de los estudios en la etapa de reconocimiento al disponer del conocimiento de varios especialistas de manera simultánea, proporcionar una fuente de juicio sin afectación de causas externas y mejorar los tiempos de análisis.

Objetivos

Objetivo General

- Desarrollar un modelo espacial orientado a identificar la localización óptima de proyectos hidroeléctricos con potencias menores a 100 MW.

Objetivos Específicos

- Diseñar un modelo conceptual y matemático que formalice los mecanismos de razonamiento experto empleados para la identificación y/o reconocimiento de proyectos hidroeléctricos con potencias menores a 100 MW.
- Construir un aplicativo basado en sistemas de información geográfica para el tratamiento semi-automatizado de los insumos del modelo.
- Evaluar el desempeño del modelo desarrollado, contrastando los resultados obtenidos con estudios de planificación en fase de proyección, prefactibilidad, factibilidad, en ejecución o desarrollados a escala departamental.

1.Revisión de literatura

1.1. Hidroenergía

Es la energía que tiene el agua cuando se mueve a través de un cauce o cuando se encuentra embalsada a cierta altura y se dejar caer para producir energía eléctrica. Esta fuente de energía se encuentra disponible en las zonas que presentan suficiente cantidad de agua; la utilización más significativa la constituyen las centrales hidroeléctricas, y para su desarrollo requiere construcciones que varían de acuerdo con las condiciones del entorno (UPME, 2015).

1.1.1. Centrales hidroeléctricas

Una central hidroeléctrica es una instalación que permite el aprovechamiento de las masas de agua en movimiento que circulan por los ríos, para transformarlas en energía eléctrica, utilizando turbinas acopladas a generadores. Después de este proceso, el agua se devuelve al río en las condiciones en que se tomó, de modo que se puede volver a usar por otra central situada aguas abajo o para consumo (UPME, 2015).

Las centrales hidroeléctricas pueden ser clasificadas en función de la caída de aprovechamiento, tipología de la estructura y según la potencia. La asociación europea de pequeñas hidrogeneradoras, *European Small Hydropower Association- ESHA* (2006) clasifica estos aprovechamientos de la siguiente manera:

- De alta caída: salto de más de 150 m
- De media caída: salto entre 50 y 150 m
- De baja caída: salto entre 2 y 20 m

Estos límites son arbitrarios y solo constituyen un criterio de clasificación. Otra clasificación en función del tipo de central sería la de:

- Aprovechamientos de agua fluyente: aquellos aprovechamientos que no disponen de embalse regulador, de modo que la central trabaja mientras el caudal que circula por el cauce del río es superior al mínimo técnico de las turbinas instaladas, y deja de funcionar cuando desciende por debajo de ese valor.
- Centrales a pie de presa con regulación propia: cuando existen embalses construidos para otros usos - regulación de caudal, protección contra avenidas, riego, alimentación de agua potable, etc. - se puede generar electricidad con los caudales excedentes, o con los desembalses para riego y abducción de agua, e incluso con el caudal ecológico que está obligado a mantener el embalse.
- Centrales en canal de riego o tubería de agua potable o residual: Este tipo de sistemas aprovecha las redes existentes para generar electricidad, se contemplan las tuberías de distribución de agua potable, canales de irrigación, navegación y las estaciones de tratamiento de agua residual.

Con respecto a la potencia, existen diversas variaciones de configuración o esquemas de proyectos de hidrogeneradoras, sin embargo la UPME (2005) adopta la clasificación que sugiere la Organización Latinoamericana de Energía - OLADE para este tipo de aprovechamientos, los cuales se describen a continuación:

- Picocentrales: Capacidad instalada entre 0,5 y 5 kW, operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas. La planta típica para el análisis corresponde en este caso a una central de 5 kW de capacidad.
- Microcentrales: Capacidad instalada entre 5 y 50 kW, operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas. La planta típica para el análisis corresponde en este caso a una central de 50 kW.

- Minicentrales: Capacidad instalada entre 50 y 500 kW, operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas. La planta típica para el análisis corresponde en este caso a una central de 500 kW. En este caso se evaluaron dos centrales una para saltos del orden de los 60 m y otra de baja caída para saltos del orden de los 4 m.
- Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH): Capacidad instalada entre 500 y 10000 kW, operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas y zonas Interconectadas (sin posibilidad de participar en el despacho eléctrico). La planta típica para el análisis corresponde en este caso a una central de 10000 kW (1 MW).
- Centrales Hidroeléctricas (CH): Capacidad instalada mayor a 20 MW, aplicable a Zonas Interconectadas, con participación obligada en el despacho eléctrico. Las plantas típicas para el análisis corresponden en este caso a centrales de 200 MW y 600 MW.

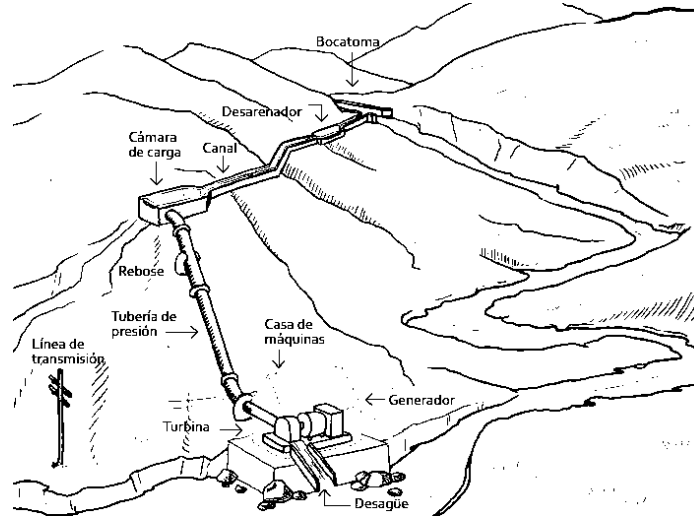
En su mayoría las hidroeléctricas de plantas menores se construyen en zonas aisladas y su área de influencia es por lo general muy reducida. La energía generada es conducida por diferentes líneas de transmisión a los centros de consumo donde se utiliza en alumbrado público y residencial, operación de electrodomésticos y demás necesidades donde se lleva a cabo el proyecto. Estas centrales tienen la desventaja de proporcionar un flujo eléctrico variable ya que los cambios climáticos y meteorológicos pueden hacer variar el caudal y por tanto se afecta de manera directa la potencia generada (Navarro et al.,2004), Sin embargo, las de menos de 20 MW en Colombia tienen ventajas en lo que respecta a la exención del pago de prima de respaldo por potencia y pueden disponer libremente su energía en el sistema eléctrico interconectado nacional, una de las posibles razones por las que este tipo de proyectos tengan una participación del 70% en el registro de proyectos de generación (UPME, 2018) (Inscripción según requisitos de las Resoluciones UPME No. 0520 y No. 0638 de 2007).

1.1.2. Pequeños aprovechamientos hidroeléctricos: panorama mundial y nacional

La generación de energía a partir del agua en movimiento, y en particular las pequeñas centrales hidroeléctricas PCH (*SHP por sus siglas en inglés Small Hydropower Plants*), durante las últimas décadas han ganado importancia debido a las ventajas económicas, ambientales y sociales que presentan sobre los grandes proyectos (Morales et al., 2015). Factores como los cortos periodos de construcción, el bajo capital de inversión, los costos de operación y el fácil mantenimiento hacen que estas iniciativas sean atractivas en países en desarrollo, además, tienen la capacidad según Liu *et al.* (2013), de contribuir con el mejoramiento de la cobertura en zonas rurales y ser parte de la solución para alcanzar un desarrollo industrial sostenible con inclusión social, en concordancia con el mandato de la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (*UNIDO, por sus siglas en inglés*).

En el contexto internacional, las pequeñas centrales hidroeléctricas PCH han sido clasificadas bajo diferentes criterios y límites de potencia (Paish, 2002; ESHA, 2006; Balmer & Spreng, 2012; Liu *et al.*, 2013; Morales *et al.*, 2015; Hudson *et al.*, 2016), no existiendo un estándar único y globalmente aceptado para caracterizar estos sistemas, sin embargo, para el objeto de este trabajo de investigación, se considera PCH a todos aquellos aprovechamientos con potencias menores a 100 MW y que no requieran estructuras de represamiento, es decir, proyectos de agua fluyente o a filo de agua. El esquema fundamental de este tipo de aprovechamientos es ilustrado en la Figura 1-1. Consta de una presa de desviación que consiste en una obra que permite desviar el agua hacia la captación o bocatoma, que regula el caudal de entrada al sistema. El caudal captado es transportado a través de un canal generalmente abierto, en algunas ocasiones suele combinarse con un desarenador u otros dispositivos para evitar el ingreso de material particulado a la turbina, en otros esquemas se ubica integrado al tanque de carga; donde inicia la tubería de presión que conduce el caudal hasta la casa de máquinas en la que se encuentra la turbina y el generador, y finalmente el canal de restitución o desagüe por medio del cual el caudal vuelve a la corriente hídrica.

Figura 1-1: Esquema típico de aprovechamiento de una PCH (Alfaro, 2014)



La configuración topográfica del sitio en que se ubican estas estructuras al igual que las condiciones de tipo geológico, geotécnico, hidrológico entre otras resultan ser diferentes en varios países observándose una tendencia similar al consultar con expertos del sector; sin embargo, el principio es el mismo y lo que se busca son sitios donde se cumpla la condición básica de un caudal y un salto en un corto tramo de río, suficiente para aprovechar la energía del agua y transformarla en electricidad. De manera análoga, también se evidencia que ciertos valores de variables son asumidas *de facto* en guías de diseño, atlas, programas y publicaciones como es el caso de las longitudes de conducción y la pendiente del drenaje en el punto de captación. Algunos de estos criterios se presentan en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1: Valores asignados a algunas variables por diferentes autores

Variable	Valor	Fuente
Pendiente del cauce en la captación (%)	3-15	INEA, 1997
	0,01-10	ESHA, 2006
Longitud de Conducción (Km.)	<5 km	Rse, 2012 (Vapidro)
	<5 km	Monk, Joyce, & Homenuke, 2009 (RHAM)
	<5 km	Rojanamon, Chaisomphob, & Bureekul, 2009
	1,2,5 km	(Serpoush, Khanian, & Shamsai, 2017)
Pendiente del canal de aducción (%)	2-5	ESHA, 2006
	0,05-0,1	Fernández & Robles, 2012
Rendimiento o eficiencia global	0,1	Rse, 2012 (Vapidro)
	7	BHA, 2012

8,5	Balmer & Spreng, 2012
8	Fernández & Robles, 2012

En lo que respecta a la capacidad instalada a finales del año 2010 las plantas hidroeléctricas alcanzaron los 1010 GW según el reporte global de energías renovables (REN21, 2013), asimismo, durante ese mismo periodo abastecieron alrededor del 16% de la electricidad consumida en el mundo (Morales *et al.*, 2015). Asia, es el continente que lidera la implementación de PCH, China cuenta con la mayor capacidad instalada a nivel global con 33 GW y un incremento anual del 7%, seguido de Japón con 4 GW e India con 2 GW. En Europa, Italia es el país con la mayor capacidad instalada con 2.7 GW, seguido de Francia, España y Alemania, aunque en número de plantas, Alemania cuenta con más de 7500 PCH, Austria con 2590, Italia 2430, Francia 1900 y República Checa con 1450 (ESHA, 2012). El continente africano, aunque cuenta con un elevado potencial hidroeléctrico, menos del 7% ha sido aprovechado (Klunne, 2007) mientras que en América, el crecimiento económico y las necesidades de energía están favoreciendo la propagación de PCH especialmente en Estados Unidos con 3 GW y Brasil con 2 GW (Morales *et al.*, 2015).

En Colombia, las PCH representan el 6% de la capacidad efectiva neta del Sistema Interconectado Nacional que resultó de 16778.75 MW a corte 31 de Diciembre de 2017 (XM, 2017), considerando no solo las plantas menores del país (<20 MW) sino aquellos proyectos entre 20 y 100 MW, como Troneras, Bajo Anchicayá, Amoyá, Ambeima, Prado, Esmeralda y los que entraron en operación en el 2015 correspondientes a Carlos Lleras, Cucuana y San Miguel. Esta baja participación refleja también el bajo crecimiento que en materia de PCH ha presentado el país en los últimos años, mientras que entre 2014 y 2015 las plantas menores percibieron un incremento cercano al 4%, la generación de energía con fuentes fósiles como Carbón y Petróleo, aumentaron en 25% y 18% respectivamente¹, situación que se acentuó en 2016, año que presentó escasez hídrica por El Niño y una menor disponibilidad para generación por la salida forzada de algunas plantas de generación importantes del SIN.

¹ Tomado de <http://informesanuales.xm.com.co/>

Aunque en 2017 la generación provino principalmente de recursos renovables, representando el 87% del total generado, (compuesta por generación del tipo hidráulica, eólica, solar y biomasa), destacando la entrada en operación de la primera planta fotovoltaica en el país: Celsia Solar Yumbo, resulta pertinente ampliar la canasta energética del país implementando de manera simultánea desarrollos de PCH.

1.2. Potencial hidroeléctrico

La puesta en marcha de plantas de energía renovable es el resultado de un proceso de toma de decisiones que debe tener en cuenta diferentes aspectos: la disponibilidad del recurso y los factores técnicos, económicos, ambientales y los factores sociales (Butera & Balestra, 2015). En relación con estos aspectos Voivontas *et al.* (1998), significaron cuatro niveles de potencial: potencial teórico, potencial disponible, tecnológico y económico. Los últimos tres términos representan un conjunto de restricciones sobre la explotación del potencial teórico.

El potencial teórico fue definido según Voivontas *et al.* (1998), como la máxima producción de energía en una región. El potencial disponible, como parte del potencial teórico que puede ser aprovechado fácilmente y con bajas restricciones de tipo impacto ambiental; el potencial tecnológico se define como la energía que puede ser aprovechada utilizando maquinaria o estructuras existentes y finalmente el potencial económico es definido por estos autores como la energía que puede ser empleada usando instalaciones económicamente viables. Estos cuatro niveles son contemplados en la mayoría de los análisis de desarrollo hidroeléctrico, particularmente en pequeños proyectos de aprovechamientos (Butera & Balestra, 2015).

Para el objeto de esta tesis, será considerado el potencial teórico en una primera aproximación, para la determinación del sitio óptimo en el que se puedan adelantar plantas menores, se tendrá en cuenta los criterios de experto y las reglas deducidas de los desarrollos existentes o en etapa previa a la operación. La potencialidad económica y tecnológica no será considerada para el objeto de la investigación, sin embargo, los resultados podrían complementarse con otras herramientas desarrolladas para el efecto.

1.2.1. Principios para la estimación de la potencia

El principio básico de la hidroenergía, está basado en la conversión de una gran parte del salto bruto, en energía mecánica y eléctrica (Balat, 2007). La potencia hidráulica $p(kW)$ se define de la siguiente manera:

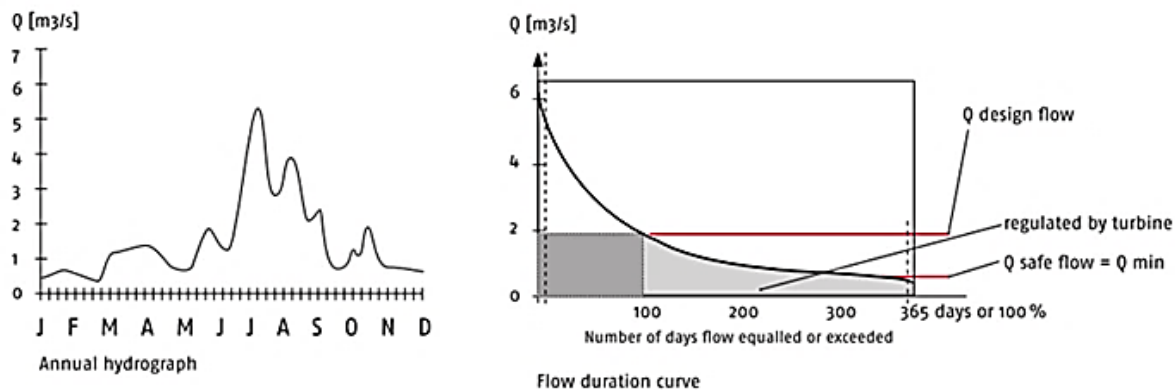
$$p(kW) = \gamma Q h \eta / 1000$$

Donde $p(kW)$ corresponde a la salida de la turbina en kW, γ gravedad específica en N/m³, Q corresponde al caudal expresado en m³/seg, h altura de salto en m y η la eficiencia de la turbina (Ghadimi, Razavi, & Mohammadian, 2011).

1.2.2. Estimación del caudal

El método a emplear para la estimación de caudales de diseño en aquellos sitios donde se pretendan adelantar desarrollos de plantas menores, depende de la disponibilidad de series históricas de información que permitan analizar el comportamiento hidrológico del drenaje o cuenca a intervenir. Si el sitio seleccionado cuenta con estaciones de aforo y suficientes registros de caudal podrían construirse los hidrogramas y las curvas de duración de caudal a partir de las cuales se estimaría el caudal de diseño (Scnitzer, 2009 ; Ghadimi *et al.*, 2011). Ver Figura 1-2.

Figura 1-2: Hidrograma y Curva de Duración de Caudales típicos de una estación de aforo (Scnitzer, 2009)

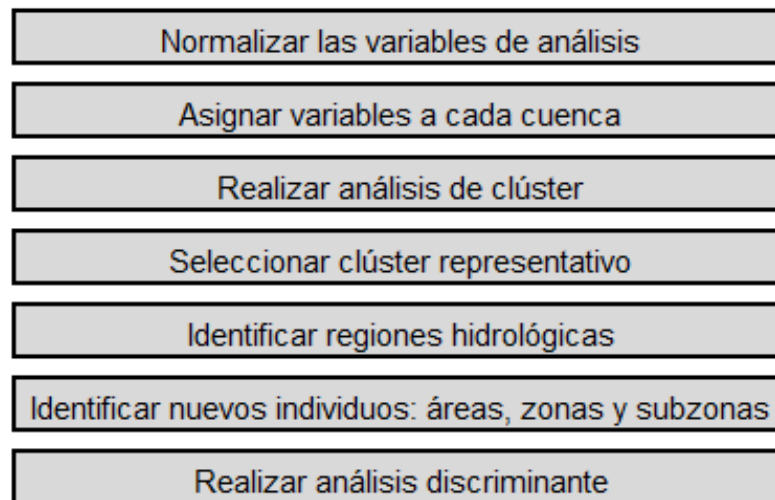


Cuando las cuencas no cuentan con estaciones de aforo, generalmente se utilizan modelos de regionalización hidrológica (Monk *et al.*, 2009; Álvarez *et al.*, 2011;

Rojanamon *et al.*, 2009; Cyr, Landry, & Gagnon, 2011; Wali, 2013) para estimar el caudal de cada uno de los drenajes en función de características físicas y climáticas tales como la temperatura, precipitación media anual, elevación, área de drenaje etc. (Cyr *et al.*, 2011).

Para el caso específico de Colombia, en el marco del proyecto Evaluación del Potencial Hidroenergético, se analizaron las regiones hidrológicas en el territorio nacional, se construyó un modelo regional basado en ecuaciones de regresión y se determinaron las curvas de duración de caudal regionalizadas, este proceso metodológico se representa en la Figura 1-3.

Figura 1-3: Esquema metodológico de la regionalización áreas hidrográficas (Pontificia Universidad Javeriana, 2015)



De este proceso, se obtuvieron 17 regiones, cada una con una función de regionalización para la estimación del caudal medio multianual con coeficientes de determinación superiores a 0,90. Las variables regresoras en cada región hidrológica son diferentes, las que se presentaron con mayor frecuencia fueron el área de la cuenca, la pendiente media de la cuenca, la precipitación, la evapotranspiración y el rendimiento hídrico; con menor frecuencia se presentaron la densidad de corrientes y el perímetro de la cuenca. El raster de caudales se construyó en función del valor del coeficiente de regresión, empleando el mapa de la red de drenaje, descrito anteriormente, sobre el cual se definió la dirección del flujo y la acumulación del caudal. El siguiente paso consistió en identificar

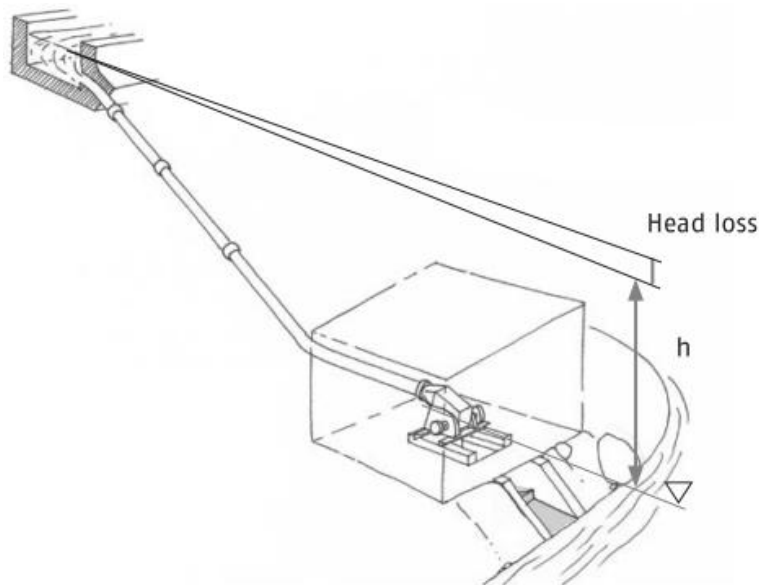
el área aferente al punto de interés, y finalmente con la ecuación de regionalización, se calculó la respectiva ecuación a partir de un álgebra de mapas entre los raster que representaban las variables regresoras.

Estas ecuaciones y las curvas de duración de caudales sintéticas, serán los insumos para la estimación del caudal de diseño en un punto de captación identificado a partir del modelo a desarrollar en este trabajo de investigación. Este proceso inicia con el cálculo del coeficiente de variación el cual permitirá para cada percentil, construir una curva de caudal adimensional la cual se multiplica por el caudal medio multianual estimado a partir de las ecuaciones de regionalización (Pontificia Universidad Javeriana, 2015).

1.2.3. Estimación del salto

El desnivel o cabeza hidráulica se considera como la diferencia de elevación entre la turbina y el reservorio o tanque de carga (Figura 1-4). Esta variable, al igual que el caudal, resulta fundamental para la estimación del potencial hidroeléctrico.

Figura 1-4: Cabeza hidráulica o caída bruta (Scnitzer, 2009)



Antes del auge de los Sistemas de Información Geográfica, la cabeza hidráulica se calculaba a partir de métodos trigonométricos en terreno, clinómetros o utilizando curvas de nivel sobre cartografía restituida. En la actualidad, se hace uso de los Modelos

Digitales de Elevación para determinar entre otras mediciones, la diferencia de alturas entre dos o más puntos o en un tramo específico de un drenaje. Varios estudios han implementado el análisis de relieve por medio de Modelos Digitales de Elevación; Yi *et al.* (2010), utilizaron algoritmos para estimar la diferencia de elevaciones entre puntos distanciados 100 m., Artan *et al.* (2014) utilizaron modelos de elevación digital para calcular desniveles en tramos de corrientes superficiales, Vallejos & Bortoni (2015) elaboraron perfiles longitudinales para evaluar el potencial hidroeléctrico en el Río Ypané en Paraguay, Soulis *et al.* (2016) automatizaron el cálculo de la cabeza hidráulica a través de un Sistema de Información Geográfica. Al respecto, se evidencia un importante desarrollo en la implementación de estas tecnologías las cuales, entre otras aplicaciones, permiten los análisis hidrológicos, hidráulicos, geomorfológicos e hidroenergéticos.

1.2.4. Métodos y modelos para la estimación del potencial hidroeléctrico

Existen numerosas técnicas empleadas para la estimación del potencial hidroeléctrico; desde trabajos realizados con cartografía análoga y visitas de campo, hasta herramientas tecnológicas sofisticadas que optimizan las actividades preliminares de reconocimiento, las cuales representan una proporción importante sobre los costos totales del proyecto.

Estas herramientas tecnológicas permiten capturar y almacenar una amplia gama de información en bases de datos geográficas que posteriormente pueden ser utilizadas para soportar la toma de decisiones sobre la implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas (Punys *et al.*, 2011).

Rojanamon *et al.* (2009), por ejemplo, propusieron un modelo basado en Sistemas de Información Geográfica para identificar sitios adecuados para el desarrollo de PCH en Tailandia considerando elementos de ingeniería, aspectos económicos y ambientales. Kusre *et al.* (2010), evaluaron el potencial hidroeléctrico usando el modelo hidrológico SWAT2000 y herramientas de análisis espacial en la cuenca del Río Kopili en India. Yi *et al.* (2010) consideraron factores topográficos, alturas de presas y restricciones de tipo ambiental en el análisis de pequeñas centrales hidroeléctricas en Korea. Ghadimi *et al.* (2011) identificaron variables de terreno como las caídas y las pendientes para identificar zonas con aptitud hidroeléctrica y validó los resultados con visitas de campo para la

provincia de Loristan en Irán. Cyr *et al.* (2011) desarrollaron una metodología para la evaluación del potencial hidroeléctrico utilizando ecuaciones de regionalización para el cálculo de caudales y una red hídrica sintética generada a partir de un modelo de elevación digital para la estimación de las caídas hidráulicas. Fitzgerald *et al.* (2012), estimaron el potencial teórico para el desarrollo de planes de energía hidroeléctrica por bombeo a partir de centrales hidroeléctricas convencionales existentes y de represas hidroeléctricas. Wali (2013), estima el potencial hidroeléctrico de una corriente no aforada en Rwanda a partir de series históricas de caudales y una evaluación topográfica del sitio seleccionado. Gergeřová *et al.* (2013) desarrollaron un SIG para la evaluación del potencial hidroeléctrico en la cuenca del río Hornád en Eslovaquia. Al-suhaili & Hassan (2014) desarrollaron un modelo para seleccionar la óptima localización de presas usando técnicas SIG. Artan *et al.* (2014) utilizaron técnicas SIG para la evaluación de plantas hidroeléctricas de baja cabeza hidráulica en el estado de Sao Paulo, Brasil. Vallejos & Bortoni (2015), hicieron uso de técnicas SIG para la determinación del potencial hidroenergético en la cuenca del Río Ypané en Paraguay. Butera & Balestra (2015), estimaron el potencial hidroeléctrico en distritos de riesgo al noroeste de Italia. Sahu (2015), Utiliza herramientas SIG para determinar la ubicación factible y estimar el potencial de pequeñas centrales hidroeléctricas en Odisha, India. Serpoush *et al.* (2017), emplearon herramientas SIG y algoritmos en MATLAB para identificación de centrales hidroeléctricas, Garegnani *et al.* (2018) integraron herramientas SIG con aspectos técnicos, legales y financieros para evaluaciones de potencial hidroeléctrico.

En Colombia, se identifican algunos desarrollos importantes como el realizado en el año 2007 por la UPME donde se presenta una primera aproximación al potencial hidroenergético utilizando una plataforma SIG en ArcView v 3.1, la evaluación del potencial en el Río Dagua (Ortiz, 2011), estudio de caso para la evaluación de potencial hidroeléctrico de plantas menores a 100 MW en el Río Negro, el estudio hidroeléctrico del Río Nechí, evaluación del potencial en el Cauca Medio, evaluación de potencial en el Río Magdalena, inventario de recursos hidroeléctricos en Antioquia (Múnera López, 2011) entre otros trabajos que fueron desarrollados a nivel de consultoría técnica, investigación o reportes técnicos no publicados. Para el año 2015, la Unidad de Planeación Minero Energética publica el Atlas de Potencial Hidroenergético del país donde se estima el caudal en la red de drenaje y las caídas hidráulicas considerando longitudes de 0.2, 1 y 5

Km utilizando la plataforma ArcGis 10.1 de ESRI. En este sentido, se evidencia un creciente interés en el sector minero energético en proyectos hidroeléctricos de pequeña escala aunque se continúan empleando para la etapa de reconocimiento, técnicas convencionales que consideran un número limitado de criterios con enfoque principalmente a la generación más que a la sostenibilidad del proyecto en el tiempo.

1.2.5. Aplicaciones tecnológicas para la identificación de sitios óptimos

Algunos países como Canadá, Italia, Noruega, Escocia y Estados Unidos han re-evaluado su capacidades hidroeléctricas con base en información espacial de sus cuencas y redes hídricas, desarrollando herramientas para la identificación automatizada de sitios óptimos para desarrollos de PCH. Asimismo, las herramientas SIG basadas en publicación Web han permitido consultar para un lugar específico el potencial aprovechable en función de los insumos del modelo (Punys *et al.*, 2011). Algunas de estas plataformas y/o programas de uso libre y privativo se describen a continuación:

- VAPIDRO ASTE: Es una herramienta numérica integrada a un Sistema de Información Geográfico que permite la evaluación del potencial hidroeléctrico y todas las posibles alternativas relacionadas con posibles sitios de explotación a lo largo de una red de drenaje. La herramienta se encuentra desarrollada en Visual Basic 6.0 (Alterach *et al.*, 2012).
- RHAM (*Rapid Hydropower Assesment Model*): Es un Sistema de Información Geográfico desarrollado en Canadá por Kerr Wood Leidal Associates Ltd (KWL), que tiene la capacidad de identificar sitios con potencial hidroeléctrico y estimar el costo de dichos proyectos. La herramienta fue desarrollada en Phyton, es de código abierto y cuenta con un visor web (Monk *et al.*, 2009).
- HYDROBOT: Es una herramienta de acceso limitado que combina evaluación financiera y técnicas SIG para identificar esquemas de hidrogeneración, fue desarrollado por Nick Forrest Associates Ltd. *et al.* y puede ser aplicado en cualquier área al interior de Escocia. (Punys *et al.*, 2011).
- NVE Atlas: Es una herramienta desarrollada por *Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE)*. El método consiste en la identificación de sitios con potencial de desarrollo hidroeléctrico que son asociados a datos hidrológicos y

costos. El acceso a la herramienta es abierto e interactivo a través de mapas publicados en la web (Punys *et al.*, 2011).

- VHP (*Virtual Hydropower Prospector*): Es una aplicación SIG diseñada para asistir a los usuarios en la localización y evaluar los recursos hidroeléctricos en los Estados Unidos. Fue desarrollada por Idaho National Laboratory y al igual que el NVE Atlas, el acceso a la herramienta es abierto e interactivo a través de mapas publicados en la web (Punys *et al.*, 2011).
- En el caso colombiano, se cuenta con una plataforma desarrollada en ArcGis Server que permite consultar los resultados de la evaluación del potencial hidroenergético del país, asimismo permite hacer consultas interactivas con respecto a los drenajes y aspectos socioeconómicos en cualquier punto de la geografía nacional.

Existen otras herramientas complementarias que facilitan y soportan la evaluación y priorización de proyectos hidroeléctricos, aunque no necesariamente tienen integrado el componente espacial. Por ejemplo RETScreen, el cual Permite al usuario evaluar proyectos de energía renovable, incluyendo la evaluación del potencial de hidroeléctrico basado en las curvas de duración de caudales y los caudales medios del sitio. También determina información financiera para el proyecto, incluyendo el costo de capital inicial, la recuperación de la inversión y las emisiones evitadas de CO₂. Otras herramientas como PEACH Software, SMART MINI IDRO, HydroHelp, HES se ocupan del análisis financiero, económico e institucional para facilitar al usuario la toma de decisiones (Punys *et al.*, 2011).

Es preciso resaltar que el modelo y la aplicación SIG producto de este trabajo de investigación es un complemento de lo que se desarrolló en el marco del proyecto Evaluación del Potencial Hidroenergético de Colombia (Pontificia Universidad Javeriana, 2015), por consiguiente, se busca la semi-automatización del proceso de identificación de sitios óptimos, que sea replicable en otros contextos, que pueda ser utilizado por los promotores y que permita el cálculo del potencial teórico en los términos definidos por los profesionales o fuentes consultadas. Para ello se busca estructurar reglas de experto que permitan formalizar los mecanismos de razonamiento que emplean los especialistas en la

etapa de reconocimiento y aplicarlos a datos espaciales de acceso libre, esto permitirá contar con multiplicidad de reglas de asociación deducidas y evaluadas con algoritmos evolutivos permitiendo al usuario conocer y modificar la línea de razonamiento empleado, aspectos estos que no se han desarrollado en los modelos existentes consultados y publicados en el contexto académico.

1.2.6. Otras consideraciones

Las variables que se consideran transversales en la evaluación del potencial teórico corresponden a la caída hidráulica y el caudal de diseño del sistema, sin embargo, la determinación sitios óptimos para adelantar las PCH obedece no solo a estos factores sino a las condiciones de estabilidad del punto de captación, la estabilidad y pendiente de la aducción, la erosión presente en la cuenca, la cobertura vegetal, la pendiente del cauce, la estabilidad del sitio de emplazamiento de la casa de máquinas, tipo de suelo entre otras, adicionalmente deben ser considerados aspectos de tipo ambiental, de disponibilidad de material de construcción, de acceso, de orden público entre otras.

Por ejemplo, en Alemania los elementos a considerar se relacionan con el acceso a vías de comunicación, construcción de la tubería de presión, equipos a emplear, necesidad de excavación, demanda de energía, interacción con otros aprovechamientos, restricciones ambientales, incentivos financieros y sistema interconectado (Balmer & Spreng, 2012). En Irán, se considera la adaptabilidad de la estructura en el sitio propuesto, mínimos efectos adversos sobre la agricultura local, fácil acceso y disponibilidad de materiales de construcción (Ghadimi *et al.*, 2011), otros autores consideran áreas de protección para abastecimiento de agua, parques naturales, distritos residenciales etc. (Yi *et al.*, 2010). Para el objeto de este trabajo de investigación, se priorizan las variables conforme a lo definido en los talleres de socialización del proyecto Evaluación de Potencial Hidroenergético de Colombia en los que participaron varias entidades del orden regional y nacional, que además puedan ser calculadas espacialmente, dando más importancia a aquellos aspectos relacionados con características físicas y climatológicas.

1.3. Sistemas expertos

Un sistema experto se define como aquel que se comporta como un experto humano en un dominio especializado del conocimiento, estas herramientas son programas que contienen unos componentes básicos como el Subsistema de Adquisición de Conocimientos, la Base de Conocimientos, el Mecanismo de Inferencia, el Subsistema de Explicación y la Interface de Usuario (Gregori, 2005).

Los sistemas expertos según Badaró et al.(2013) pueden ser clasificados en:

- **Basados en reglas previamente establecidas:** trabajan mediante la aplicación de reglas, comparación de resultados y aplicación de las nuevas reglas basadas en situación modificada.
- **Basados en casos:** El razonamiento basado en casos es el proceso de solucionar nuevos problemas basándose en las soluciones de problemas anteriores.
- **Basados en redes bayesianas:** modelo gráfico probabilístico (un tipo de modelo estático) que representa un conjunto de variables aleatorias y sus dependencias condicionales a través de un gráfico acíclico dirigido. Por ejemplo, una red bayesiana puede representar las relaciones probabilísticas entre enfermedades y síntomas. Dados los síntomas, la red puede ser usada para computar las probabilidades de la presencia de varias enfermedades.
- **Sistemas expertos difusos:** se desarrollan usando el método de lógica difusa, la cual trabaja con incertidumbre. Esta técnica emplea el modelo matemático de conjuntos difusos, simula el proceso del razonamiento normal humano permitiendo a la computadora comportarse menos precisa y más lógicamente que las computadoras convencionales.

La adquisición de conocimientos permite que se puedan añadir, eliminar o modificar elementos de conocimiento (en la mayoría de los casos reglas) en el sistema experto. La Base de Conocimientos contiene el conocimiento de los hechos y de las experiencias de los expertos en un dominio determinado (Gregori, 2005). Estas reglas pueden ser

inferidas de diversas maneras, sin embargo las estrategias ampliamente utilizadas corresponden al empleo de encuestas exploratorias con preguntas estructuradas o semiestructuradas (Fuentes & Ferrer, 2015) y revisión de literatura (Lewis *et al.*, 2015).

El motor o mecanismo de inferencia tiene como función recorrer la base de conocimientos para alcanzar una solución utilizando los datos que se le suministran. Se puede partir considerando todos los datos conocidos y luego ir progresivamente avanzando hacia la solución. Este proceso se lo denomina guiado por los datos o de encadenamiento progresivo (*forward chaining*, hacia delante, deductivo o *modus ponens*). Por otra parte, se puede seleccionar una posible solución y probar su validez buscando evidencia que la apoye. Este proceso se denomina guiado por el objetivo o de encadenamiento regresivo (*backward chaining*, hacia atrás, inductivo o *modus tollens*) (Gregori, 2005). Entre las técnicas que se pueden emplear para obtener de un conjunto de variables, la solución adecuada en función del razonamiento experto; se destacan la lógica difusa y las redes neuronales, aunque también se emplean los algoritmos genéticos o evolutivos, teoría del caos, teoría del aprendizaje y el razonamiento aproximado (Chahuara, 2005). La lógica difusa presenta sobre las redes neuronales ciertas ventajas relacionadas con la facilidad de implementación, permite describir el comportamiento de un sistema a partir de sentencias, utilizar el conocimiento de un experto y encontrar soluciones sencillas con menor tiempo de diseño (Chahuara, 2005; Fallis, 2013), sin embargo el tratamiento previo de los datos requiere procesos de discretización que podrían impactar la calidad de las reglas obtenidas.

Una de las técnicas de mayor uso para encontrar relaciones entre los atributos de una base de datos corresponde a las reglas de asociación. Varios estudios en Big Data se han centrado en extraer reglas booleanas o de asociación nominal, sin embargo, en aplicaciones más complejas, es necesario emplear dominios continuos (Martín & Riquelme-santos, 2018), es en este caso donde adquieren relevancia los algoritmos evolutivos, los cuales han sido empleados en diversas investigaciones para la deducción de reglas de asociación cuantitativas.

La principal motivación para aplicar algoritmos evolutivos para extracción de conocimiento de bases de datos es que constituyen algoritmos de búsqueda robustos y

adaptativos con enfoque multiobjetivo (en lugar de único objetivo), eliminando algunas de las limitaciones de los enfoques actuales. Asimismo, permiten calcular métricas de calidad de las reglas y eliminar aquellas que resulten poco interesantes (Martín et al., 2014), las reglas aplicadas para una tarea en particular se puede evidenciar en el módulo de explicación del modelo o en cualquier esquema que permita al usuario entender la línea de razonamiento seguida para la salida del modelo.

2. Materiales y Métodos

2.1. Materiales

Los materiales empleados para el desarrollo del proyecto, corresponden a un Computador Desktop, memoria instalada 16 GB, Procesador Intel Core (TM) 3.4 GHz, Sistema Operativo Windows 7 Ultimate con accesorios para digitalización y escaneo, se utilizó el programa ArcGis V.10.3, KNIME, Keel y la extensión VISIO de Microsoft Office para la estructuración del modelo conceptual.

2.2. Metodología

La metodología empleada para la construcción del modelo, diseño del aplicativo y evaluación de desempeños consta de tres etapas: una consulta a expertos, revisión de fuentes secundarias, aprendizaje y extracción de reglas de una base de datos, construcción del modelo que permita la identificación de sitios óptimos para desarrollos hidroeléctricos y finalmente la revisión de los sitios óptimos identificados a la luz de las reglas aplicadas en contraste con los proyectos existentes en el país en todas sus etapas.

2.2.1. Consulta a expertos y fuentes secundarias

Para la construcción de la base de conocimientos y la selección de variables como insumos para el modelo, se hizo uso de la información resultante de los espacios de socialización del proyecto de Evaluación de Potencial Hidroenergético de Colombia. Talleres que se realizaron en el año 2013 y 2014 en la ciudad de Medellín y Bogotá respectivamente.

La metodología de los talleres estuvo soportada en el Proceso Analítico Jerárquico - PAJ (Analytical Hierarchy Process - AHP), técnica usada para la toma de decisiones con atributos múltiples y que, además permite la aplicación de datos, experiencia, conocimiento, e intuición de una forma lógica y profunda dentro de una jerarquía como un todo (Saaty, 2008).

Como primer paso, y definido el objetivo de identificar los sitios óptimos para la identificación de proyectos hidroeléctricos con potencias menores a 100 MW, se procedió con la definición de qué criterios (factores y limitantes) van a ser tenidos en cuenta (Gómez Delgado & Barredo Cano, 2005). Inicialmente, el equipo planificador identificó cincuenta y dos (52) criterios considerados determinantes en el proceso de identificación de proyectos hidroeléctricos de pequeña escala (**Anexo A** – Matriz de evaluación de alternativas). La puntuación de los criterios o valoración de alternativas incluyó una escala de 1 a 5, siendo 5 el valor de mayor importancia y 1 menor importancia.

Se realizó la encuesta a 45 profesionales especializados de distintas entidades y organizaciones nacionales e internacionales. Las entidades participantes fueron:

- Nivel internacional: Fondo Mundial Para la Naturaleza - WWF y Conservación Internacional - TNC.
- Nivel nacional: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS, Ministerio de Transporte, Parques Nacionales Naturales de Colombia, Dirección General Marítima- DIMAR, Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt - IAvH, Servicio Geológico Colombiano - SGC, Agencia Nacional de Licencias Ambientales - ANLA y Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG.
- Nivel regional: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR, Corporación Autónoma Regional del Guavio - CORPOGUAVIO, Corporación Autónoma Regional del Caldas - CORPOCALDAS, Corporación Autónoma Regional de Chivor - CORPOCHIVOR y Corporación Autónoma Regional del Alto del Magdalena - CAM.

- Nivel Privado: CELSIA, ISAGEN, Empresas Públicas de Medellín - EPM, SEDIC S.A., Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica - ACOLGEN, ANDEG, EMGESA, Consultores Unidos, Gómez Cajiao y Opmtim Consul.

De manera simultánea, a través de una encuesta exploratoria y preguntas estructuradas y semiestructuradas, les fue solicitado a los expertos la construcción de reglas empleadas desde su experiencia, para el reconocimiento y/o identificación preliminar de proyectos hidroeléctricos con el objetivo de construir reglas de decisión a partir de los factores y criterios limitantes valorados a juicio de experto.

Para complementar la información aportada y considerando la necesidad de implementar una herramienta SIG para el tratamiento semi-automatizado de los insumos como parte de los objetivos de este trabajo, fue necesario consultar fuentes bibliográficas. Se obtuvo información de manuales, guías de diseño, tesis de investigación tratando de tabular para cada criterio, los valores cuantitativos y categóricos empleados para la fase de reconocimiento de proyectos de pequeña escala, asimismo se empleó la información cartográfica del Estudio del Sector de Energía Eléctrica y la información geográfica de la UPME. Algunas de las guías consultadas corresponden a las desarrolladas por Elliott (1981); Novillo *et al.* (1985); ESHA (2006); Jica (2009); BHA (2012); Serpoush *et al.*, (2017).

2.2.2. Extracción de conocimiento de las bases de datos

El conocimiento puede ser deducido también, de desarrollos existentes en fase de reconocimiento, prefactibilidad, factibilidad o proyectos en operación. Para el efecto se emplearon técnicas no supervisadas de minería de datos como complemento a los insumos obtenidos tanto de las encuestas como de la revisión bibliográfica de publicaciones, manuales y guías. En este sentido, se implementaron algoritmos evolutivos que permiten la deducción de relaciones generalmente ocultas en las bases de datos y de difícil interpretación debido al elevado volumen de información (Martínez-Ballesteros *et al.*, 2014).

El insumo para la aplicación de los algoritmos evolutivos corresponde a las principales estructuras de un aprovechamiento hidroeléctrico, como lo es la captación, conducción y la casa de máquinas. Estas estructuras se georreferenciaron tomando los diseños

consignados en el Estudio del Sector Eléctrico ESSE, se cartografiaron 293 presas, 202 embalses, 175 casas de máquinas y más de 300 proyectos, 49 menores a 100MW (**Anexo B** - Inventario de proyectos ESSE). Adicionalmente se contó con la base de datos de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas en fase de perfil, prefactibilidad y factibilidad suministrada por la UPME, complementada con la revisión del Sistema de Información Eléctrico y estudios departamentales disponibles en internet, este conjunto de datos incluyó 113 proyectos o desarrollos hidroeléctricos a filo de agua.

Se empleó para la manipulación de datos y la implementación de los algoritmos el programa de uso libre KNIME (Konstanz Information Miner), que proporciona un entorno gráfico para el acceso, transformación, análisis y visualización de los datos y el KEEL (Knowledge Extraction based on Evolutionary Learning), herramienta de código abierto empleada para el diseño de experimentos con diferentes conjuntos de datos y algoritmos de inteligencia computacional con particular énfasis a los algoritmos evolutivos.

2.2.3. Modelo conceptual y matemático, prototipo del aplicativo

Esta etapa consiste en la representación esquemática del modelo a desarrollar, los insumos requeridos y las técnicas de procesamiento para identificar los sitios óptimos para el desarrollo de proyectos hidroeléctricos de plantas menores. La herramienta empleada para el diseño del modelo conceptual fue Microsoft Visio 2010, que permite representar insumos, flujos de trabajo y resultados. Los geoprosos fueron estructurados en Model Builder de ArcGis v. 10.3., los cuales resultan compatibles con scripts de código abierto que pueden ser complementados con otros entornos de desarrollo.

3. Resultados y discusión

Los resultados presentados en este capítulo, corresponden al desarrollo del modelo conceptual y matemático, la construcción del aplicativo y la evaluación de desempeño del modelo en algunos de los drenajes en el territorio nacional en los que se identificaron proyectos hidroeléctricos en todas sus etapas.

3.1. Desarrollo del modelo

3.1.1 Deducción de reglas

El desarrollo de un modelo basado en reglas, requiere de una etapa inicial de adquisición de conocimientos. La colaboración de los expertos consultados es quizás, el elemento más importante para el desarrollo del sistema (Castillo & Hadi, 1997). Partiendo de este principio, se presentan los resultados para la deducción de las reglas a partir de la consulta a expertos, revisión bibliográfica y extracción de relaciones entre factores y criterios limitantes conducentes al reconocimiento de sitios para el desarrollo de proyectos hidroeléctricos menores a 100 MW.

Los criterios para el desarrollo de PCH en Colombia derivados de los juicios de valor de los expertos consultados, resultaron orientados principalmente a las restricciones de tipo ambiental y social que se presentan en el país y que, condicionan el desarrollo de proyectos hidroeléctricos a pequeña escala. De los cincuenta y dos (52) criterios sometidos a evaluación, diecisiete (17) obtuvieron puntuaciones altas de conformidad con la escala de valoración establecida por el equipo planificador. Los criterios tipo factor y limitantes que resultaron con una importancia alta en la fase de reconocimiento de proyectos hidroeléctricos a pequeña escala se relacionan a continuación:

- Sistema de parques nacionales naturales
- Reservas forestales protectoras
- Parques naturales regionales
- Páramos
- Humedales
- Humedales RAMSAR
- Resguardos indígenas y títulos colectivos de comunidades negras
- Parques arqueológicos
- Hallazgos arqueológicos por municipios
- Suelos
- Detritos
- Estabilidad del terreno
- Topografía
- Caudal
- Caídas hidráulicas
- Estrechamientos
- Conducción

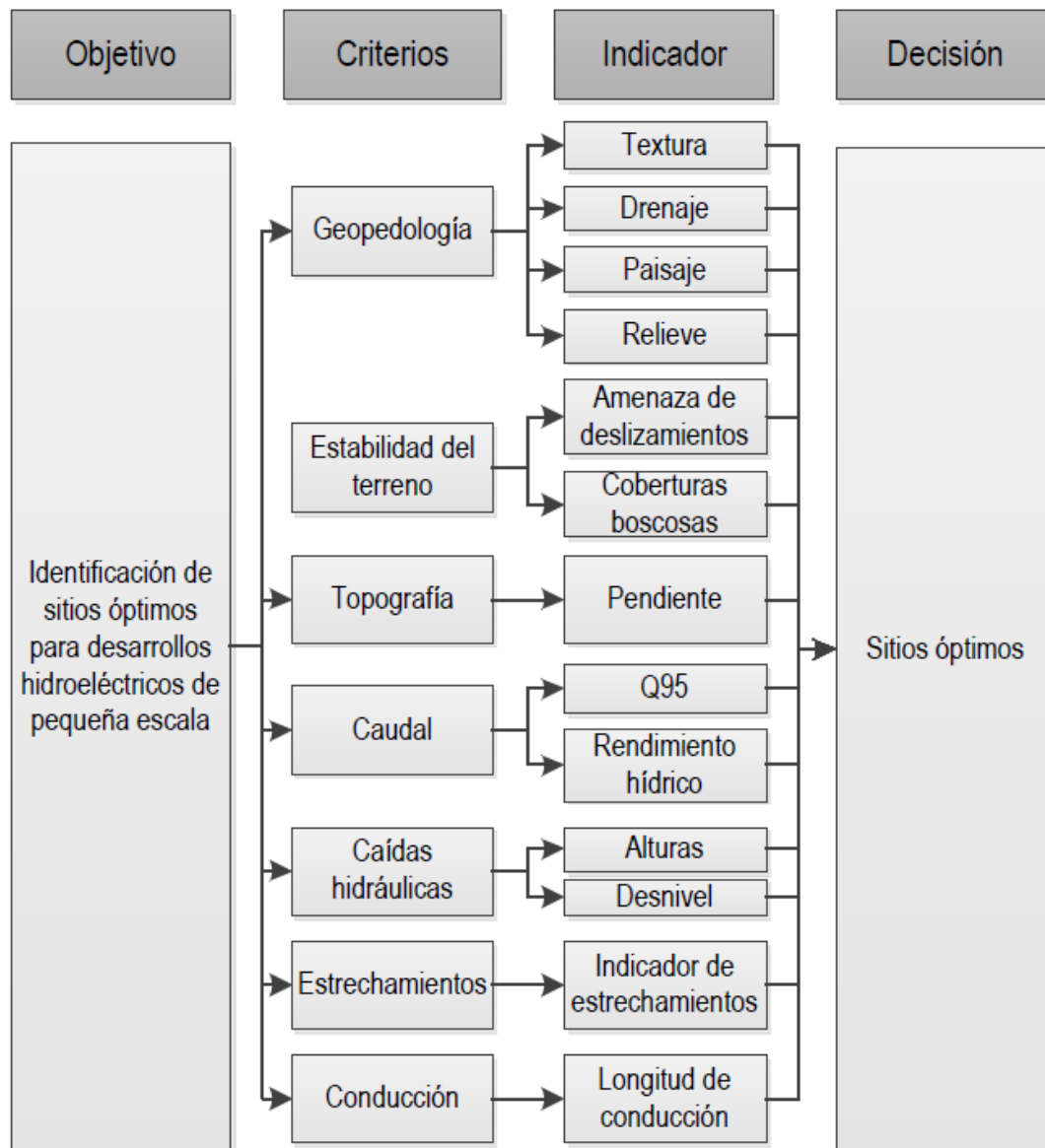
Como se puede evidenciar los primeros siete criterios, de conformidad con la definición de Gómez Delgado & Barredo Cano (2005), son de tipo limitante, es decir; se genera una capa binaria en la cual un código representa las alternativas susceptibles de ser elegidas para la actividad, y otro la no disponibilidad para la actividad, como es el caso por ejemplo de las zonas de importancia ambiental.

Dada la orientación del modelo de identificar sitios óptimos con potencial teórico para generación de energía hidroeléctrica y que además pueda ser replicado en otros contextos, se optó por hacer uso de los criterios tipo factor, es decir, aquellos que realzan o detractan la capacidad de asentamiento de una alternativa específica para la actividad en consideración (Gómez Delgado & Barredo Cano, 2005) como es el caso de los suelos, detritos, estabilidad del terreno, topografía, caudal, caídas hidráulicas, estrechamientos y la conducción, a los que se le podría incluir en esta tipología de

critérios dada la multiplicidad de sus atributos. Algunos de los criterios sometidos a valoración pueden ser agrupados en tanto que, una fuente o capa de información puede responder a un criterio, pero también a múltiples indicadores como es el caso de la geopedología, que incluye variables como textura, drenaje, paisaje y relieve.

En la **Figura 3-1** se presenta la estructura jerárquica para la identificación de sitios óptimos.

Figura 3-1: Estructura jerárquica para la identificación de sitios óptimos.



Aunque la valoración de alternativas permitió identificar los criterios de mayor importancia en la etapa de reconocimiento de proyectos hidroeléctricos de pequeña escala, en un segundo momento fue necesario deducir las características de un sitio óptimo a la luz de los indicadores. Esta última actividad, posterior a la valoración de los criterios, no resultó exitosa dada la generalidad con la que fue abordada la temática por los profesionales consultados.

En virtud de esta dificultad, se recurrió al análisis de información secundaria como manuales, publicaciones especializadas, guías de diseño y trabajos de grado, así como la información deducible de los elementos cartografiados tanto de la UPME como del Estudio del Sector Eléctrico, que permitió posteriormente estructurar y evaluar un conjunto de reglas de asociación aplicables a los insumos del modelo (**Anexo C** - Documentos consultados).

Para la construcción de las reglas de asociación cuantitativas se seleccionaron los siguientes criterios cuyas fuentes de información se encuentran disponibles en el país:

- **Geopedología:** Las unidades geopedológicas son espacios delimitados, en donde interactúan variables de clima ambiental, paisaje, tipo de relieve, material parental y suelo en lo relacionado con la taxonomía y las diferentes características físicas, químicas y mineralógicas (IGAC, 2014).

Este criterio permite abordar para los efectos de este trabajo, los indicadores de textura, drenaje, paisaje y relieve. Estos indicadores permitieron materializar criterios de suelo y detritos valorados por los expertos como de alta importancia, en la medida que la presencia de este tipo de material incide en el costo de mantenimiento y operación, principalmente en rejillas, tuberías, captaciones o presas. La información empleada fue el mapa de unidades geopedológicas elaborado por el IGAC escala 1:100.000 (2014).

- **Estabilidad del terreno:** Se entiende por estabilidad a la seguridad de una masa de tierra contra la falla o movimiento (Matteis, 2003). Este criterio se homologó con el indicador de zonificación de amenaza de movimientos en masa

desarrollado por el Servicio Geológico Colombiano (2015), al que se le dio tratamiento limitante toda vez que las zonas con amenazas altas son consideradas por los expertos como restrictivas para desarrollos de proyectos hidroeléctricos de pequeña escala.

- **Topografía:** La topografía como criterio para efectos de este trabajo hace referencia a las características locales en las que se podría desarrollar un proyecto hidroeléctrico de pequeña escala. En un sentido estricto la topografía se relaciona con la pendiente del terreno (indicador) en el sitio en el que se ubica la captación, casa de máquinas y la conducción. Se utilizó el modelo de elevación *Shuttle Radar Topography Mission* SRTM de 1ArcSec. Este factor no fue discretizado para evitar pérdida de información y para facilitar la deducción de reglas de asociación cuantitativas a través de algoritmos evolutivos.
- **Caudal:** Este criterio hace referencia al caudal promedio anual estimado en función de las regiones hidrológicas de Colombia (León et al., 2016) a las cuales les fueron establecidas ecuaciones lineales que describen el comportamiento de los percentiles Q_1 , Q_5 , Q_{10} , Q_{20} , Q_{30} , Q_{40} , Q_{50} , Q_{60} , Q_{70} , Q_{80} , Q_{90} , Q_{95} y Q_{99} (Pontificia Universidad Javeriana, 2015). El caudal es normalmente representado por Q , y el valor de excedencia como un número subíndice en este sentido, el Q_{95} -empleado para la estimación de la potencia teórica del modelo- significa el caudal con probabilidad de excedencia del 95%. Además del Q_{95} se empleó el rendimiento hídrico medio o cantidad de agua que fluye por unidad de área derivado del Estudio Nacional de Agua (IDEAM, 2014).
- **Caídas hidráulicas:** Las caídas hidráulicas son consideradas por los expertos uno de los criterios de mayor relevancia al momento de estimar potencial teórico. Este criterio se dedujo del modelo de elevación *Shuttle Radar Topography Mission* SRTM de 1ArcSec estimando las alturas entre las captaciones y las casas de máquina y los desniveles entre ambas estructuras.
- **Estrechamientos:** Los estrechamientos o tramos con valles acentuados minimizan las estructuras de captación (Faria, 2011) y consecuentemente el

volumen de excavación y estructuras de hormigón (Navarro Mora & Liévano Hurtado, 2004). El indicador para la aplicación de este criterio se realizó en función de la pendiente en un área de influencia circular de radio 100 m. alrededor de las estructuras de captación y casas de máquina. La suma de las pendientes en grados en esta área se incorporó en el modelo como un indicador del grado de estrechamiento en el sector evaluado.

- **Conducción:** El indicador asociado al criterio es la longitud de conducción. Aunque no se evidencia una justificación de carácter técnico ampliamente desarrollada al respecto, la mayoría de los expertos consultados así como las referencias bibliográficas (Monk et al., 2009), (Rojanamon et al., 2009), (Serpoush et al., 2017) establecieron, que una longitud inferior a los 5 km. en la conducción resulta adecuada para proyectos hidroeléctricos a pequeña escala.

Los anteriores indicadores fueron calculados para el conjunto de datos geográficos resultantes del ESSE y de la UPME, posteriormente se implementaron siete algoritmos evolutivos sobre las bases de datos consolidadas, empleando las herramientas KNIME y Keel que permiten la extracción de conocimiento a través de reglas de asociación cuantitativas (RACs). Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 3-1: Calidad de las reglas por algoritmo para captaciones, datos ESSE.

Ítem	ALAT A	EARMGA- A	GAR- A	GENAR- A	MODENAR- A	MOPNAR- A	QAR- CIP
<i>Number of Frequent Itemsets generated</i>			100				
<i>Number of Association Rules generated:</i>	1	100	134	30	57	65	235
<i>Average Support:</i>	0.01	0.09	0.76	0.55	0.37	0.4	0.13
<i>Average Confidence:</i>	1	1	0.93	0.89	0.93	0.95	0.99
<i>Average Lift:</i>	2.22	3.06	1.12	1.13	11.36	11.07	163.78
<i>Average Conviction:</i>	Infinity	Infinity	Infinity	2.07	Infinity	Infinity	Infinity
<i>Average Certain Factor:</i>	1	0.55	0.59	0.48	0.67	0.94	0.98
<i>Average Netconf:</i>	0.55	0.17	0.58	0.26	0.24	0.79	0.95
<i>Average YulesQ:</i>	1	0.35	0.75	0.65	0.71	1	1
<i>Average Number of Antecedents:</i>	3	2	2	11	6	2.64	2.29
<i>Number of Covered Records (%):</i>	0.35	100	100	71.58	61.65	100	100

Tabla 3-2: Calidad de las reglas por algoritmo para casas de máquinas, datos ESSE.

Ítem	ALATA	EARMG A-A	GAR- A	GENAR- A	MODENAR- A	MOPNAR- A	QAR- CIP
<i>Number of Frequent Itemsets generated</i>			100				
<i>Number of Association Rules generated:</i>	1	100	2	30	55	59	245
<i>Average Support:</i>	0,16	0.3	0.73	0.7	0.46	0.35	0.05
<i>Average Confidence:</i>	1	1	0.87	0.95	0.91	0.96	0.99
<i>Average Lift:</i>	1.1	1.02	1.02	1.24	20.3	14.51	133.63
<i>Average Conviction:</i>	Infinity	Infinity	1.14	4.3	Infinity	Infinity	Infinity
<i>Average Certain Factor:</i>	1	0.06	0.12	0.76	0.78	0.94	0.98
<i>Average Netconf:</i>	0.11	0.01	0.12	0.67	0.65	0.77	0.97
<i>Average YulesQ:</i>	1	0.06	0.37	0.96	0.96	1	1
<i>Average Number of Antecedents:</i>	2	2	2	4	2	2.51	2.1
<i>Number of Covered Records (%):</i>	15.12	100	96.52	75.59	98.26	99.42	88.96

Tabla 3-3: Calidad de las reglas por algoritmo para captaciones, datos UPME.

Ítem	ALATA	EARMG A-A	GAR- A	GENAR- A	MODENAR- A	MOPNAR- A	QAR- CIP
<i>Number of Frequent Itemsets generated</i>			100				
<i>Number of Association Rules generated:</i>	1	100	21	30	77	45	368
<i>Average Support:</i>	0.02	0.25	0.72	0.44	0.37	0.41	0.07
<i>Average Confidence:</i>	1	1	0.9	0.83	0.73	0.98	1
<i>Average Lift:</i>	4.08	1.04	1.02	1.12	3.78	10.66	94.17
<i>Average Conviction:</i>	Infinity	Infinity	1.12	1.51	Infinity	Infinity	Infinity
<i>Average Certain Factor:</i>	1	0.15	0.1	0.34	0.13	0.98	1
<i>Average Netconf:</i>	0.77	0.02	0.07	0.19	0.08	0.92	0.99
<i>Average YulesQ:</i>	1	0.09	0.25	0.46	0.16	1	1
<i>Average Number of Antecedents:</i>	2	2	2	6	2.19	2.27	2.02
<i>Number of Covered Records (%):</i>	1.89	100	98.12	70.76	80.19	98.12	100

Tabla 3-4: Calidad de las reglas por algoritmo para casas de máquina, datos UPME.

Ítem	ALATA	EARMGA -A	GAR-A	GENAR- A	MODENAR -A	MOPNAR -A	QAR- CIP
<i>Number of Frequent Itemsets generated</i>			100				
<i>Number of Association Rules generated:</i>	1	100	23	30	57	36	140
<i>Average Support:</i>	0.01	0.27	0.58	0.68	0.66	0.51	0.13
<i>Average Confidence:</i>	1	1	0.96	0.83	0.93	0.98	1
<i>Average Lift:</i>	3.52	1.03	1.19	1.13	5.82	7.33	81.44
<i>Average Conviction:</i>	Infinity	Infinity	Infinity	1.53	Infinity	Infinity	Infinity
<i>Average Certain Factor:</i>	1	0.28	0.72	0.35	0.47	0.97	1
<i>Average Netconf:</i>	0.73	0.02	0.44	0.49	0.22	0.91	0.97
<i>Average YulesQ:</i>	1	0.24	0.79	0.8	0.53	1	1
<i>Average Number of Antecedents:</i>	2	2	2.48	4	2	2.14	2.01
<i>Number of Covered Records (%):</i>	0.92	100	96.34	83.49	96.34	99.09	100

De los algoritmos empleados en los conjuntos de datos, el de mejor desempeño fue el GENAR-A (Mata et al., 2002). La calidad de las reglas generadas se evaluó en función de la cantidad de reglas generadas, del soporte, la confianza, lift, factor de certeza, factor de convicción, NetConf y YulesQ (Martínez-Ballesteros, Martínez-Álvarez, Troncoso, & Riquelme, 2014b).

Para el caso de los algoritmos ALATA (Alatas & Akin, 2006), EARMGA-A (Yan, Zhang, & Zhang, 2009), QAR-CIP (Martín et al., 2014) se generaron reglas de bajo soporte y bajo nivel de registros cubiertos, para los algoritmos MODENAR-A, MOPNAR-A (González et al., 2016) y GAR-A (Mata et al., 2002) se generaron reglas con alto soporte y confianza pero altas dependencias entre variables, hecho que denota relaciones evidentes como es el caso de la capacidad instalada y la energía en firme o la altura y los desniveles. El resultado detallado por cada algoritmo se encuentra en el **Anexo C** – Resultados algoritmos evolutivos.

Finalmente, de las encuestas aplicadas en los talleres de experto, consultas de fuentes secundarias y análisis por medio de algoritmos evolutivos, se presentan las reglas de mayor desempeño en la siguiente tabla:

Tabla 3-5: Reglas generadas para la selección de sitios óptimos.

Conducción		
Indicador	Regla	
Longitud	<5000 m	
Longitud/desnivel	25<L/H<40	
Potencias (Caudal y Caídas)	10<PkW<100000	

Captaciones		
Indicador	Regla	
Altura - Estrechamientos	<i>Alt</i> [894, 2130]	<i>Estr*</i> [434.33, 1090.23]
Pendiente local - Estrechamientos	<i>Slope_degree</i> [9.47, 32.09]	<i>Estr*</i> [434.33, 1090.23]
Rendimiento hídrico - Estrechamientos	<i>rhmed</i> [3.35, 111.85]	<i>Estr*</i> [0.0, 875.95]
Relieve	<i>Montaña</i> <---	[<i>Filas-y-vigas</i>]
Estabilidad	<i>Amenazas de deslizamientos = Baja o Media</i>	
Textura	<i>Geopedología/Textura = Textura Gruesa</i>	

Casa de Máquinas		
Indicador	Regla	
Pendiente local - Estrechamientos	<i>Slope_degree</i> [0.68, 26.94]	<i>Estr*</i> [148.09, 750.49]
Relieve	<i>Montaña</i> <---	[<i>Filas-y-vigas</i>] [<i>Textura Media-Drenaje</i>]
Drenaje	<i>Montaña</i> <---	<i>Bueno</i>]
En terrazas aluviales	<i>Geopedología/ Tipo_Relieve = Terrazas Aluviales</i>	
Sobre la cota máxima de inundación	<i>Geopedología/Tipo_Relieve ≠ Plano de Inundación</i>	
Coberturas boscosas	<i>Cobertura = 1 (Bosque)</i>	
Zonas estables, sin deslizamientos	<i>Amenazas de deslizamientos = Baja o Media</i>	

* Estr: Índice de estrechamientos, el aplicativo genera este indicador con el nombre SUM

El proceso de aplicación de las reglas consultadas de diferentes fuentes y deducidas del análisis de los algoritmos evolutivos, se puede sintetizar en dos momentos; el primero correspondiente a la estimación de la potencia teórica que involucra principalmente a la estructura de conducción y en un segundo momento considera sitios óptimos para ubicación de estructuras de captación y casas de máquina.

En cuanto a las conducciones, las reglas empleadas se relacionan con longitudes menores a 5 km., radio longitud/desnivel entre 25 y 40 y potencias superiores a 10 kW y menores a 100 MW. Estas reglas resultan aplicables a los tramos de los drenajes sintéticos en formato vectorial, lo que permitirá estimar la potencia teórica del tramo en kW.

Las reglas de asociación cualitativas y cuantitativas sugieren que las estructuras de captación deben ubicarse preferiblemente en zonas con índices de estrechamientos entre 434.33 y 1090.23 y/o pendientes entre 9.47 y 32.09 grados que a su vez se encuentren sobre los 894 y 2,130 msnm. Asimismo, estas estructuras deben ser ubicadas en zonas con baja o media susceptibilidad a deslizamientos, texturas gruesas y relieve montañoso.

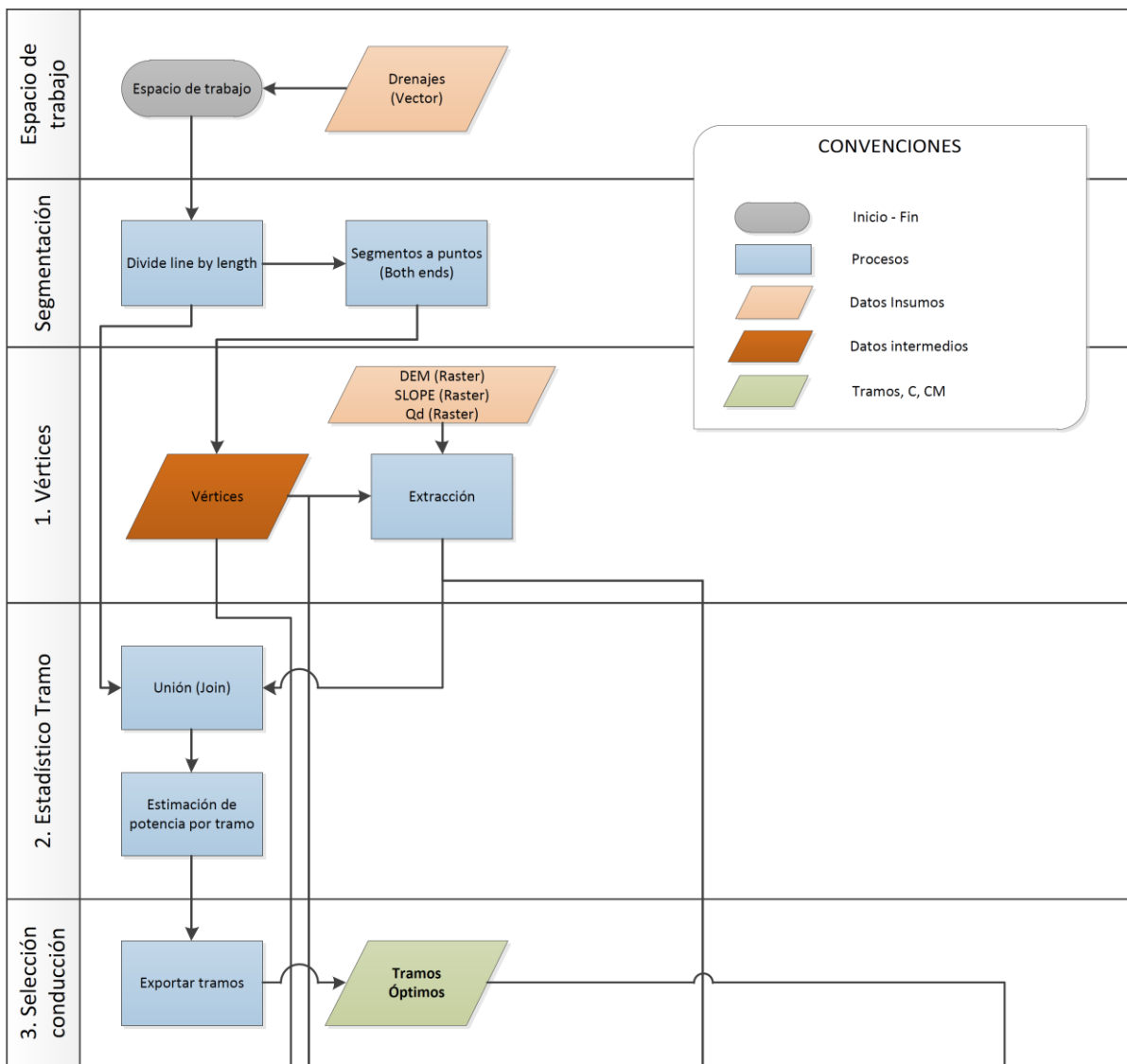
Un sitio óptimo para las casas de máquina, a la luz del algoritmo evolutivo de mejor desempeño, debe presentar zonas con pendientes entre 0.68 y 26.94 grados que a su vez cuente con estrechamientos entre 148.09 y 750.49, debe ubicarse en zonas con texturas medias, buen drenaje, con baja o media susceptibilidad a deslizamientos, en terrazas aluviales, sobre la línea de árboles y nunca en planos de inundación.

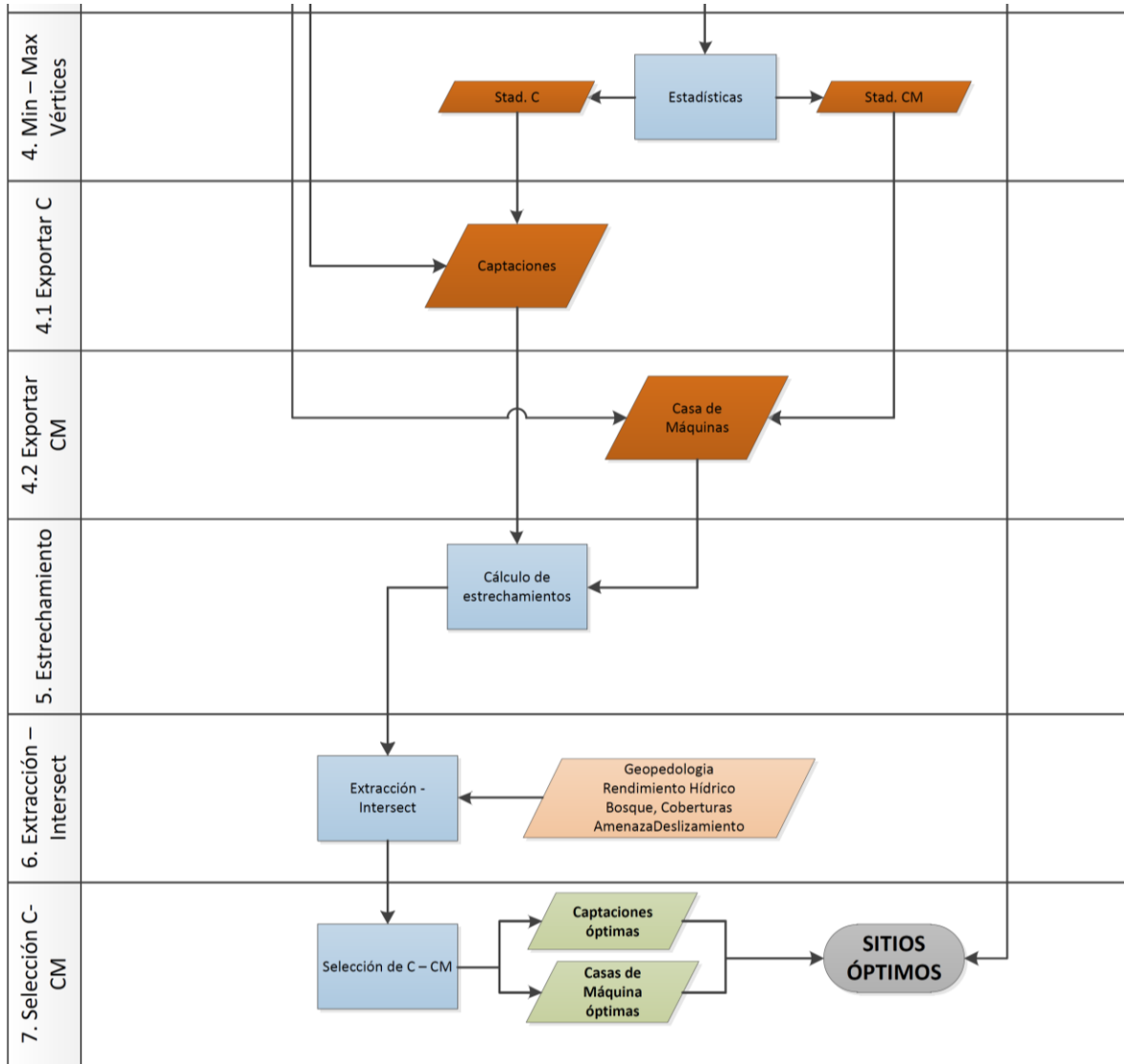
Si un sitio cumple con estas condiciones se considera que es óptimo para el desarrollo de un proyecto hidroeléctrico menor a 100 MW a la luz de los criterios empleados. La aplicabilidad de las reglas podrá verse afectada por la calidad de los insumos y la extensión del área geográfica, toda vez que podrá presentarse o no, sitios que cumplan estrictamente con todas las condiciones descritas anteriormente, en este caso es necesario flexibilizar las reglas y emplear según criterio del usuario, aquellas que resulten aplicables a su zona de estudio, específicamente las relacionadas con la ubicación de las estructuras de captación y de casas de máquina.

3.1.2 Modelo conceptual

La Figura 3.1 corresponde al modelo conceptual que se siguió en el marco de este trabajo de investigación para la selección de sitios óptimos a partir de los insumos del modelo y los criterios empleados para el efecto.

Figura 3-2: Modelo conceptual identificación de sitios óptimos





3.2 Diseño del aplicativo

El aplicativo inicia con la definición del espacio de trabajo, este será el repositorio donde se incorporarán los resultados del modelo. La estructura de la base de datos de archivos (GDB) se encuentra preestablecida, por lo tanto, el usuario deberá dispondrá de una base de datos cada que realice todo el procedimiento del modelo, el cual se encuentra estructurado en un ArcToolBox de ESRI (**Anexo D** – Modelo_Potencial_V.2.tbx). El insumo en esta primera etapa es la capa de drenajes tipo vector derivada de la aplicación

del algoritmo D8 previo al proceso de regionalización de caudales desarrollado en el marco del proyecto de Potencial Hidroenergético de Colombia.

Aunque el ejercicio de aplicación de este modelo contempla insumos generados previamente, es posible generar la propia red de drenaje para una cuenca en particular empleando modelos de elevación diferentes al que se usó en el marco del proyecto. Asimismo, con las ecuaciones de regionalización para Colombia estimadas por León et al. (2016), es posible calcular los caudales de diseño y obtener los demás parámetros que permiten la estimación de la potencia teórica y consecuentemente la identificación de sitios óptimos.

Una etapa preparatoria del modelo consiste en la segmentación de los drenajes seleccionados para el análisis de identificación de sitios óptimos. Para el efecto se pueden emplear diferentes técnicas y diferentes programas, en este caso se hizo uso del algoritmo *Divide Line by Length* que puede obtenerse como complemento del programa ArcMap. Este proceso genera tantos segmentos como drenajes sean seleccionados para el análisis y adiciona un campo con un identificador único para cada uno de estos tramos. La herramienta *Vértices* del modelo, transforma ambos extremos de cada tramo en elementos tipo punto que simulan las estructuras de captación y casa de máquinas para cada segmento, asimismo extrae de la información existente –y cargada previamente en el entorno de trabajo-, los datos de altura y caudal de diseño Q_{95} . Esta información resulta del modelo ajustado hidrológicamente SRTM 1ArcSec y de la red tipo raster de caudales generadas del proceso de regionalización hidrológica para Colombia (León et al., 2016). Para efectos de reconocimiento de proyectos hidroeléctricos a pequeña escala y a filo de agua, este modelo considera la conducción como la longitud del tramo comprendido entre las estructuras de captación y descarga de caudales. El script consiste básicamente en la aplicación del proceso *Feature Vertices To Points* y *Extract Multi Values to Point* a la captación y casa de máquinas por cada tramo.

```

# Local variables:
drenaje = "drenaje"
vertices = "B:\\Prueba Tesis\\Drenajes_Finales\\PR_DRENAJES.gdb\\EST\\vertices"

# Process: Feature Vertices To Points
arcpy.FeatureVerticesToPoints_management
(drenaje, vertices, "BOTH_ENDS")

# Process: Extract Multi Values to Points
arcpy.gp.ExtractMultiValuesToPoints_sa
(vertices, "Q95Col Qd;DEM Alt", "NONE")

# Process: Add Field
arcpy.AddField_management
(vertices, "ESTR", "DOUBLE", "", "", "", "", "NULLABLE", "NON_REQUIRED", "")

```

En un segundo momento la herramienta *Estadísticos Tramo*, calcula para cada segmento la potencia teórica del tramo. Este proceso lo realiza tomando para cada conjunto de estructuras por tramo, la diferencia o rango de elevaciones y el caudal mínimo entre estos, realiza una unión de tablas con el atributo ID del tramo – que también lo contienen los vértices- y finalmente calcula la potencia asumiendo que el producto de los rendimientos es de 0.85 (Fernández & Robles, 2012), la fórmula de cálculo es :

$$P_{kw} = 8 * Q_{dmin} * RANGE_{Alt}$$

Donde P_{kw} corresponde a la Potencia expresada en kilovatios, Q_{dmin} es el caudal mínimo entre las dos estructuras del tramo que correspondería al de la captación y $RANGE_{Alt}$ es el desnivel entre la captación y la casa de máquinas. La línea de código se presenta a continuación:

```

# Local variables:
summarize = vertices
drenaje = "drenaje"

# Process: Summary Statistics
arcpy.Statistics_analysis
(vertices, summarize, "Qd MIN;Alt RANGE", "ORIG_FID")

# Process: Add Join
arcpy.AddJoin_management
(drenaje, "Tramo", summarize, "ORIG_FID", "KEEP_ALL")

# Process: Calculate Field
arcpy.CalculateField_management
(drenaje, "drenaje.Pkw", "8* [summarize.MIN_Qd] * [summarize.RANGE_Alt]", "VB", "")

# Process: Calculate Field (2)
arcpy.CalculateField_management
(drenaje, "drenaje.L_H", "[drenaje.Shape_Length] / [summarize.RANGE_Alt]", "VB", "")

# Process: Remove Join
arcpy.RemoveJoin_management(drenaje_5, "summarize")

```

El tercer paso *Selección Conducción* consiste en la selección de los tramos o conducciones óptimas desde el criterio de potencia y la relación entre la longitud (L) de la corriente y el desnivel (H) (JICA, 2009). El modelo en esta etapa genera dos escenarios; el primero que considera tramos con potencias superiores a 10 kW y menores a 100000kw y el segundo, más restrictivo que considera los tramos que presenten el anterior rango de potencias pero que, además su relación L/H esté entre 10 y 50 (JICA, 2009). La línea de código es:

```
# Local variables:
drenaje_esc1 = drenaje
drenaje_esc2 = drenaje

# Process: Select
arcpy.Select_analysis(drenaje, drenaje_esc1, "\"Pkw\" >10 AND \"Pkw\" <100000")

# Process: Select (2)
arcpy.Select_analysis
(drenaje, drenaje_esc2, "\"Pkw\" >10 AND \"Pkw\" <100000) AND \"L_H\" <=50")
```

El cuarto paso *Min – Max Vertices* consiste en la categorización y separación de las estructuras de captación y casa de máquinas que, hasta el momento es considerada por el modelo en una sola capa de información. Este proceso se realiza por dos razones fundamentales; la primera, relacionada con la aplicabilidad de las reglas, que resultan ser diferentes tanto para las captaciones como para las casas de máquina y en segundo lugar para reducir la inconsistencia topológica producida por el traslape de estructuras. Este último aspecto se representa en la siguiente figura:

Figura 3-3: Esquema de segmentación de drenajes, traslape de estructuras



El modelo logra la separación de las estructuras en dos conjuntos de datos aplicando una estadística resumen al archivo Vértices tipo punto generado en la primera etapa de aplicación del modelo. En este paso se generan dos archivos tipo tablas, uno para captaciones (Stat_C) y otro para casa de máquinas (Stat_CM), estas tablas permitirán mediante uniones con el archivo vectorial de vértices, seleccionar y exportar un archivo vectorial para captaciones y otro para casa de máquinas. El siguiente es el código:

```
# Local variables:
vertices = "vertices"
Stat_C = "B:\\Prueba Tesis\\Drenajes_Finales\\PR_DRENAJES.gdb\\Stat_C"
Stat_CM = "B:\\Prueba Tesis\\Drenajes_Finales\\PR_DRENAJES.gdb\\Stat_CM"
C = "B:\\Prueba Tesis\\Drenajes_Finales\\PR_DRENAJES.gdb\\EST\\C"
CM = "B:\\Prueba Tesis\\Drenajes_Finales\\PR_DRENAJES.gdb\\EST\\CM"

# Process: Summary Statistics
arcpy.Statistics_analysis(vertices, Stat_C, "Qd MIN", "ORIG_FID")

# Process: Summary Statistics
arcpy.Statistics_analysis(vertices, Stat_CM, "Qd MAX", "ORIG_FID")

# Process: Add Join
arcpy.AddJoin_management(vertices, "ORIG_FID", Stat_C, "ORIG_FID", "KEEP_ALL")

# Process: Calculate Field
arcpy.CalculateField_management(vertices, "vertices.ESTR", "[vertices.Qd] - [Stat_C.MIN_Qd]", "VB", "")

# Process: Remove Join
arcpy.RemoveJoin_management(vertices, "Stat_C")

# Process: Select
arcpy.Select_analysis(vertices, C, "vertices.ESTR = 0")

# Process: Add Join
arcpy.AddJoin_management(vertices, "ORIG_FID", Stat_CM, "ORIG_FID", "KEEP_ALL")

# Process: Calculate Field
arcpy.CalculateField_management(vertices, "vertices.ESTR", "[vertices.Qd] - [Stat_CM.MAX_Qd]", "VB", "")

# Process: Select
arcpy.Select_analysis(vertices, CM, "vertices.ESTR = 0")
```

En el paso 5 *Estrechamientos*, el modelo ejecuta un buffer de 100 m de radio sobre las estructuras de captación y casas de máquinas extrayendo la suma de las pendientes en grados asociado al ID de la estructura. Estos valores de estrechamientos permitirán aplicar las reglas relacionadas con este criterio a los puntos generados en el análisis. El código es el siguiente:

```

# Local variables:
C_buf = C
C_SUM = C_buf
CM_buf = CM
CM_SUM = CM_buf
slope_degree = "slope_degree"

# Process: Buffer
arcpy.Buffer_analysis(CM, CM_buf, "100 Meters", "FULL", "ROUND", "NONE", "", "PLANAR")

# Process: Zonal Statistics as Table
arcpy.gp.ZonalStatisticsAsTable_sa
(CM_buf, "vertices_ORIG_FID", slope_degree, CM_SUM, "DATA", "SUM")

# Process: Buffer
arcpy.Buffer_analysis(C, C_buf, "100 Meters", "FULL", "ROUND", "NONE", "", "PLANAR")

# Process: Zonal Statistics as Table
arcpy.gp.ZonalStatisticsAsTable_sa(C_buf, "ORIG_FID", slope_degree, C_SUM, "DATA", "SUM")

```

En el paso 6 se realiza la extracción de datos con las capas raster y vectoriales, para alimentar de atributos los archivos vectoriales correspondientes a las captaciones y casas de máquinas y posteriormente aplicarles las reglas estructuradas en el primer paso. El proceso se sigue a continuación:

```

# Local variables:
C = C
C_F = C
CM_ = CM
CM_F = CM
BNB = "SBQ_SMBYC_BQNBQ_V7_2016.tif"
Mapa_Geopedologico_Colombia = "Mapa_Geopedologico_Colombia"
slope_degree = "slope_degree"
rhmed = "rhmed"
AME = "AMEmmINTEG2016.tif"

# Process: Extract Multi Values to Points
arcpy.gp.ExtractMultiValuesToPoints_sa
(CM, "SBQ_SMBYC_BQNBQ_V7_2016.tif BNB_1;slope_degree Slope_degree;rhmed rhmed;AMEmmINTEG2016.tif AME", "NONE")

# Process: Intersect
arcpy.Intersect_analysis("'Prueba Final\\CM' #;Mapa_Geopedologico_Colombia #", CM_F, "ALL", "", "INPUT")

# Process: Extract Multi Values to Points
arcpy.gp.ExtractMultiValuesToPoints_sa
(C, "slope_degree slope_degree;rhmed rhmed;AMEmmINTEG2016.tif AME", "NONE")

# Process: Intersect
arcpy.Intersect_analysis("'Prueba Final\\C' #;Mapa_Geopedologico_Colombia #", C_F, "ALL", "", "INPUT")

```

Finalmente en el paso 7 *Selección C-CM*, se aplican las reglas estructuradas a través de una selección sobre el conjunto de datos de captaciones y casas de máquinas, este proceso generará dos escenarios considerando solo las reglas aplicables a cada estructura. El código es el siguiente:

```

# Local variables:
C_F = C_F
C_F_Esc1 = C_F_1
C_F_Esc2 = C_F_2
CM_F = CM_F
CM_F_Esc1 = CM_F_1
CM_F_Esc2 = CM_F_2

# Process: Add Join
arcpy.AddJoin_management(C_F, "ORIG_FID", C_SUM, "ORIG_FID", "KEEP_ALL")

# Process: Select
arcpy.Select_analysis(C_F_1, C_F_Esc1, "C_F.DRENAJE ='Gruesa' AND C_F.AME <=3")

# Process: Select (2)
arcpy.Select_analysis(C_F_2, C_F_Esc2, "(C_SUM.SUM <1090.23 AND C_SUM.SUM >434.33) AND (C_F.slope_degree <32.09 AND C_F.slope_degree > 9.47)")

# Process: Add Join (2)
arcpy.AddJoin_management(CM_F, "vertices_ORIG_FID", CM_SUM, "vertices_ORIG_FID", "KEEP_ALL")

# Process: Select (3)
arcpy.Select_analysis(CM_F_1, CM_F_Esc1, "NOT CM_F.TIPO_RELIE = 'Plano de inundación' AND CM_F.AME <=3")

# Process: Select (4)
arcpy.Select_analysis(CM_F_2, CM_F_Esc2, "( CM_SUM.SUM <750.49 AND CM_SUM.SUM >148.09) AND CM_F.slope_degree <26")

```

El proceso de selección de sitios óptimos se realiza analizando captaciones, conducciones y casas de máquina, en este sentido si las reglas empleadas se cumplen en todos los conjuntos de datos (conducción, captación y casa de máquinas), se considera que el sitio identificado por el modelo es óptimo a la luz de los criterios aplicados.

La estructura del aplicativo permite modificar las reglas de decisión (considerando los resultados de las reglas deducidas por los diferentes métodos) y ajustar el esquema de razonamiento de conformidad con las necesidades del usuario, toda vez que la aplicación estricta de las reglas puede generar resultados idealizados o fuera de contexto. La herramienta SIG puede emplearse para identificación de sitios óptimos y para la evaluación del potencial hidroenergético teórico y aprovechable. En este sentido, promotores, corporaciones regionales, entidades del sector minero energético, entidades territoriales y la academia podrán emplearla para sus fines toda vez que sean referidos los créditos correspondientes.

3.3 Evaluación de desempeño del modelo.

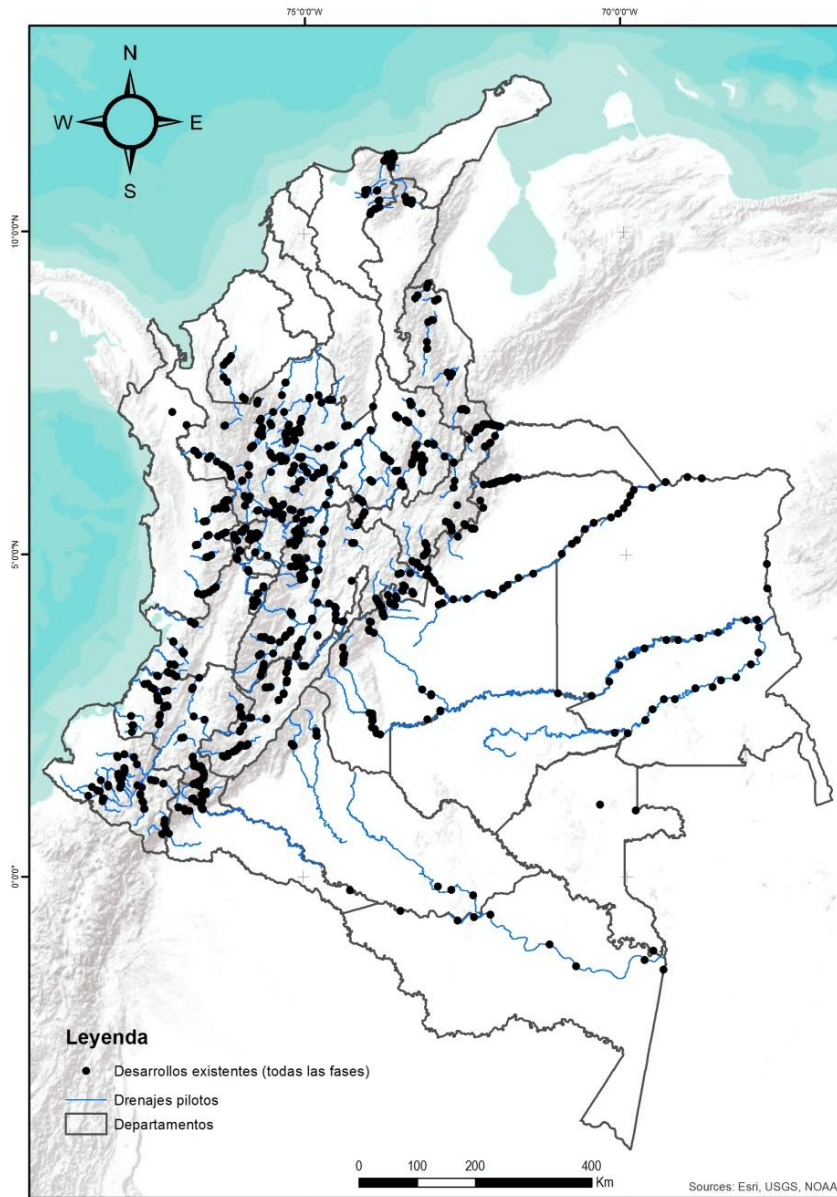
Los sitios identificados en este trabajo así como la estimación de la potencia de estos, corresponden a un cálculo teórico basado en las reglas deducidas y su aplicación sobre datos espaciales. Para evaluar las salidas del modelo se siguió el enfoque tradicional de compararlos con proyectos existentes o que estén en proceso de desarrollo a nivel de reconocimientos o con estudios y diseños (Rojanamon et al., 2009), (Kusre et al., 2010), (Fitzgerald et al., 2012), (Bayazit et al., 2017), (Moiz et al., 2018), (Garegnani, Sacchelli, Balest, & Zambelli, 2018b).

Para el efecto se evaluaron las salidas del modelo, con desarrollos existentes para todo el país en 185 corrientes de agua que suman 20.251 km de longitud y en el que se identificaron 394 desarrollos; 155 a filo de agua y el restante con estructuras de almacenamiento y regulación de caudal. Algunos de los drenajes más importantes seleccionados para el proceso fueron los ríos Cauca, Magdalena, Porce, Nechí, Grande, Medellín, Amagá y San Juan en el departamento de Antioquia; río Quinchía en Risaralda, río Amoyá en Tolima, río Caquetá parte alta y baja; ríos Telembí, Patía, Caindú, Ñambí en Nariño; río Micay en Cauca, río Guayabero en Guaviare; río Tarra en la región de Catatumbo, río Meta, Inírida y algunos drenajes de las Sierra Nevada de Santa Marta como lo son los ríos Fundación, Guatapurí, Tucurínca y Aracataca. El resumen de los sitios existentes identificados por el modelo se presenta en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6: Salidas del modelo y relación con proyectos existentes.

Categoría	Número de desarrollos existentes	Número de sitios óptimos identificados por el modelo (Diferentes longitudes de conducción)			Desarrollos existentes identificados por el modelo (Diferentes longitudes de conducción)		
		1 km	2.5 km	5 km	1 km	2.5 km	5 km
Desarrollos todas las potencias	394	925	356	163	93	81	74
Desarrollos menores a 100 MW	155	925	356	163	40	34	28

Se deduce entonces que, el concepto de sitios óptimos desarrollado en el modelo, coincide con la realidad en promedio el 21% de las veces si se toma como referentes los proyectos hidroeléctricos registrados en la UPME y los identificados en el ESSE, que se presentan en la Figura 3-4.

Figura 3-4: Desarrollos identificados en el ESSE y suministrados por la UPME.

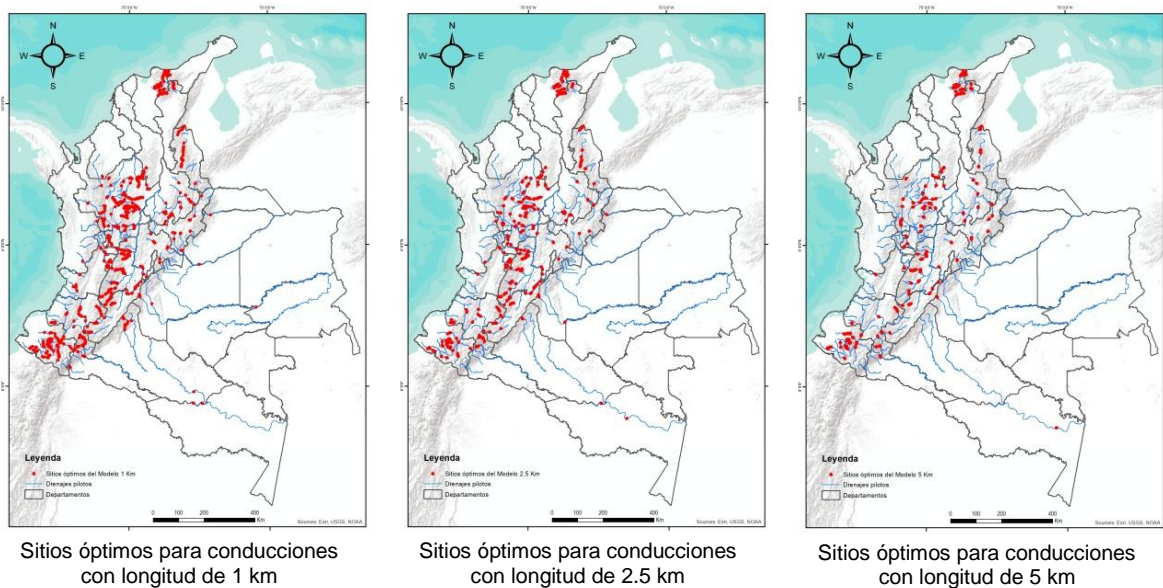
A nivel de criterios, en un primer momento se evidencia el efecto que tiene la conducción la topografía, las caídas hidráulicas, los estrechamientos y el caudal en la identificación de sitios óptimos, sin embargo, el efecto de la estabilidad del terreno y la geopedología incorporan al modelo la capacidad de identificar sitios óptimos no solo en función de la

generación sino de la operación y de manera indirecta en la sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

En este sentido, se evidencia que a una menor longitud de conducción se incrementa el desempeño del modelo debido a que, un mayor número de tramos incrementa la posibilidad de coincidencia entre los sitios óptimos modelados y los proyectos existentes o en desarrollo.

El efecto de la topografía y/o relieve, se evidencia en el hecho que el 90% de las coincidencias se presentaron por encima de los 200 msnm y en paisajes montañosos. Por debajo de esta cota y en paisajes de valles, planicies aluviales y lomeríos, las salidas del modelo coincidieron en pocas ocasiones con los proyectos de referencia. En estas zonas se observa también, el efecto de los algoritmos para la generación de drenajes sintéticos y delimitación de cuencas, los cuales resultan ser menos efectivos en zonas de baja pendiente (Ramirez, 2002), esto a su vez impacta de manera adversa el cálculo de caudales, la dirección de flujo de los drenajes y consecuentemente la capacidad del modelo para la identificación de sitios óptimos en este tipo de relieves. En la Figura 3-5, se presentan las salidas del modelo para diferentes longitudes de conducción y los sitios óptimos coincidentes en la zona oriental del país.

Figura 3-5: Sitios identificados por el modelo coincidentes con los proyectos de referencia.



La geopedología y la estabilidad del terreno corresponden a criterios de tipo limitante, cuya aplicación permitió filtrar o reducir el número de opciones posibles que el modelo identificó en función de los factores. Aunque la coincidencia entre las salidas del modelo y los proyectos de referencia resultó baja, se evidencian núcleos o clúster de generación que prevalecen para todas las longitudes de conducción y que coinciden con las zonas donde se encuentran desarrollos en etapa de prefactibilidad, con estudios y diseños e incluso en operación, como es el caso del departamento de Antioquia y eje cafetero, Nariño y Sierra Nevada de Santa Marta. La no coincidencia del modelo con los proyectos de referencia podría estar relacionada con que los criterios atendidos en la etapa de reconocimiento de estos no fueron estrictamente orientados a generación sino que obedece a criterios operativos y/o logísticos como distancia a centros poblados, sistema interconectado, facilidad de acceso o restricciones ambientales, los cuales no fueron abordados en este trabajo.

En cuanto a la capacidad del modelo para identificar aprovechamientos en función de la potencia, se evidencia que la totalidad de las salidas del modelo coinciden con desarrollos de pequeñas y grandes centrales hidroeléctricas, es decir aprovechamientos superiores a los 500 kW.

Tabla 3-7: Sitios identificados por el modelo en función de la potencia teórica con longitud de conducción de 1 km.

Tipo de desarrollo	Clase	Sitios óptimos identificados por el modelo	Desarrollos existentes coincidentes con el modelo
Pico y Micro centrales	0 - 50	63	0
Minicentrales	50 - 500	299	0
Pequeñas Centrales	500 - 20000	563	31
Grandes Centrales	>20000	0	62
Total		925	93

Tabla 3-8: Sitios identificados por el modelo en función de la potencia teórica con longitud de conducción de 2.5 km.

Tipo de desarrollo	Clase	Sitios óptimos identificados por el modelo	Desarrollos existentes coincidentes con el modelo
Pico y Microcentrales	0 - 50	63	0
Minicentrales	50 - 500	299	0
Pequeñas Centrales	500 - 20000	563	30
Grandes Centrales	>20000	0	51
Total		925	81

Tabla 3-9: Sitios identificados por el modelo en función de la potencia teórica con longitud de conducción de 5 km.

Tipo de desarrollo	Clase	Sitios óptimos identificados por el modelo	Desarrollos existentes coincidentes con el modelo
Pico y Microcentrales	0 - 50	63	0
Minicentrales	50 - 500	299	0
Pequeñas Centrales	500 - 20000	563	24
Grandes Centrales	>20000	0	50
Total		925	74

De las tablas anteriores es posible deducir que el modelo desarrollado permite identificar sitios óptimos para pequeñas y grandes centrales hidroeléctricas empleando insumos a escala 1:100.000 y de resolución espacial de 30 m como el caso del Modelo de Elevación Digital SRTM. El empleo de modelos de elevación digital con mejor resolución espacial (12.5 m o menor) permitirá una mejor estimación de los desniveles, pendientes locales, optimización de redes de drenaje y mejoras en la estimación de los caudales, lo que se traduce en un mayor número proyectos identificados, particularmente pico, micro y minicentrales.

4. Conclusiones

El empleo de algoritmos evolutivos para la deducción de reglas de asociación cuantitativas y la revisión bibliográfica, constituyeron alternativas frente a la dificultad de definir reglas a partir de encuestas, talleres y consulta a expertos. Estos algoritmos incluyen métricas que permitieron evaluar la calidad de las reglas generadas y que, en combinación con otras reglas extraídas de la bibliografía permitieron estructurar los mecanismos de razonamiento empleados por los expertos para el reconocimiento de proyectos hidroeléctricos menores a 100 MW.

En cuanto al aplicativo SIG, este ofrece la posibilidad de identificar sitios óptimos y evaluar el potencial hidroenergético teórico y aprovechable indistintamente de la escala de los insumos. La estimación del potencial teórico ofrece ventajas sobre las herramientas desarrolladas hasta el momento para la identificación de proyectos en la medida que, considera no solo la generación, sino que incorpora criterios para la ubicación de las estructuras más importantes de un aprovechamiento a filo de agua como es la captación y la casa de máquinas. La herramienta ofrece la posibilidad de ser ajustada y complementada con criterios limitantes para estimación del potencial aprovechable y podrá en este sentido, ser utilizada por promotores, corporaciones regionales que expiden licencias y permisos, entidades del sector minero energético, entidades territoriales y la academia.

Aunque las coincidencias entre las salidas del modelo y los proyectos de referencia fueron significativamente bajas, se considera que la herramienta brinda elementos orientadores en la etapa de reconocimiento de pequeñas y grandes centrales

hidroeléctricas. Las diferencias entre lo simulado y lo real no solo a nivel posicional sino a nivel de atributos, están relacionadas con la calidad de los insumos y la metodología para estimación de los caudales de diseño principalmente, toda vez que el caudal empleado en el modelo obedece a un proceso de regionalización hidrológica y el cálculo de desniveles se realizó a partir de un modelo de elevación digital afectado por múltiples factores y que difiere de manera significativa con los métodos empleados en los estudios de referencia de esta investigación.

Anexo A - Matriz de evaluación de alternativas

Anexo B - Inventario de proyectos ESSE

Anexo C - Resultados algoritmos evolutivos

Anexo D - Modelo_Potencial_V.2.tbx

Bibliografía

- Al-suhaili, R. H., & Hassan, R. H. (2014). A Developed Model for Selecting Optimum Locations of Water Harvesting Dams Using GIS Techniques *مادختساباً تبنقتة مظنة تامولعملا* 20(1), 20(1). *تيفارغجلا ريوطتة جذومذ رايتخلا عقاوملا ي لثملا دودسل داصد مايملا*.
- Alatas, B., & Akin, E. (2006). An efficient genetic algorithm for automated mining of both positive and negative quantitative association rules. *Soft Computing*, 10(3), 230–237. <https://doi.org/10.1007/s00500-005-0476-x>
- Alfaro, O. (2014). *Centrales hidroeléctricas de pequeña escala , la experiencia de la Fundación Solar en Guatemala*. Guatemala. Retrieved from <http://www.revistavirtualpro.com/>
- Alterach, J., Elli, A., & Vergata, M. (2012). D5 . 3 Customized Tools (Software) Vapidro Aste 4 . 0 User Guide Work Package 5 - Common Strategies To.
- Álvarez-Olguín, G., Sustaita-Rivera, F., & Hotait- Salas, N. (2011). Identificación de regiones hidrológicas homogéneas mediante análisis multivariado. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XII, 277–284. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v12n3/v12n3a4.pdf>
- Artan, G. a., Cushing, W. M., Mathis, M. L., & Tieszen, L. L. (2014). Low-head hydropower assessment of the Brazilian State of Sao Paulo. <https://doi.org/10.3133/ofr20141206>
- Badaró, S., Javier Ibañez, L., & Agüero, M. J. (2013). Sistemas Expertos: Fundamentos, Metodologías y Aplicaciones. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 13, 349–363. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18682/cyt.v1i13.122>
- Balat, H. (2007). A renewable perspective for sustainable energy development in Turkey: The case of small hydropower plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 2152–2165. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.002>
- Balmer, M., & Spreng, D. (2012). Hydroelectric Power. *Fuel*, 193–209.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-054808-1.00011-9>

- Bayazit, Y., Bakış, R., & Koç, C. (2017). An investigation of small scale hydropower plants using the geographic information system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 289–294. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.062>
- BHA. (2012). The British Hydropower Association A GUIDE TO UK MINI-HYDRO. *The British Hydropower Association*, 1–37.
- Butera, I., & Balestra, R. (2015). Estimation of the hydropower potential of irrigation networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 140–151. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.046>
- Castillo, E., & Hadi, A. S. (1997). Sistemas Expertos y Modelos de Redes Probabilísticas, 639.
- Chahuara Quispe, J. C. (2005). *Control neuro-difuso aplicado a una Grúa Torre*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Cunningham, R. (2003). La energía, historia de sus fuentes y transformación. *Petrotecnia*, 7.
- Cyr, J.-F., 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*, 36(11), 2940–2950. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.04.003>
- Elliott, C. R. (1981). *Small hydropower for asian rural development*. Bangkok, Thailand.
- ESHA. (2006). Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica, 305. Retrieved from www.esha.be/fileadmin/esha_files/.../GUIDE_SHP_ES_01.pdf
- ESHA. (2012). Small Hydropower Roadmap Condensed research data for EU-27.
- Fallis, A. . (2013). Lógica Difusa. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Faria, F. A. M. de. (2011). Metodologia de prospecção de pequenas centrais hidrelétricas, 1–212. Retrieved from http://www.aneel.gov.br/biblioteca/trabalhos/trabalhos/Dissertacao_Felipe_Faria.pdf
- Fernández, I., & Robles, A. (2012). Centrales de Generación de Energía Eléctrica.
- Fitzgerald, N., Lacal Arántegui, R., McKeogh, E., & Leahy, P. (2012). A GIS-based model to calculate the potential for transforming conventional hydropower schemes and non-hydro reservoirs to pumped hydropower schemes. *Energy*, 41(1), 483–490. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.044>
- Fuentes-Bargues, J. L., & Ferrer-Gisbert, P. S. (2015). Selecting a small run-of-river

- hydropower plant by the analytic hierarchy process (AHP): A case study of Miño-Sil river basin, Spain. *Ecological Engineering*, 85, 307–316.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.10.020>
- Garegnani, G., Sacchelli, S., Balest, J., & Zambelli, P. (2018a). GIS-based approach for assessing the energy potential and the financial feasibility of run-off-river hydro-power in Alpine valleys. *Applied Energy*, 216(December 2017), 709–723.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.043>
- Garegnani, G., Sacchelli, S., Balest, J., & Zambelli, P. (2018b). GIS-based approach for assessing the energy potential and the financial feasibility of run-off-river hydro-power in Alpine valleys. *Applied Energy*, 216(December 2017), 709–723.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.043>
- Gergelová, M., Kuzevičová, Z., & Kuzevič, S. (2013). A GIS based assessment of hydropower potential in Hornád basin, 18, 91–100.
- Ghadimi, A. A., Razavi, F., & Mohammadian, B. (2011). Determining optimum location and capacity for micro hydropower plants in Lorestan province in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 4125–4131.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.003>
- Gómez Delgado, M., & Barredo Cano, J. (2005). Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. In ALFAOMEGA (Ed.) (2da ed., p. 278). Madrid.
- González, K., Mena, O., & Martín, D. (2016). PAR-KNIME: CONJUNTO DE PLUGINS PARA EXTRAER REGLAS DE ASOCIACIÓN CUANTITATIVAS EN KNIME.
- Gopal, C., Mohanraj, M., Chandramohan, P., & Chandrasekar, P. (2013). Renewable energy source water pumping systems - A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 351–370.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.012>
- Gregori, F. A. (2005). *Fundamentos de Inteligencia Artificial*. San Vicente del Raspeig - España. Retrieved from www.dccia.ua.es
- Hudson, J., Ferreira, I., Roberto, J., Almansa, J., Camargo, S., & Júnior, G. (2016). Assessment of the potential of small hydropower development in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 380–387.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.035>
- IDEAM. (2014). Estudio Nacional del Agua. Retrieved from www.ideam.gov.co

- IGAC. (2014). Mapa de geopedología del territorio colombiano escala 1:100.000, 2014(4338), 61.
- INEA. (1997). *Guía de diseño de prequeñas centrales hidroeléctricas*. Bogotá D.C.
- ISA. (1979). *Estudio del Sector de Energía Eléctrica*.
- Jica. (2009). Manuals and Guidelines for Micro-hydropower Development in Rural Electrification Volume I. *Technology, I*(June), 1–268.
- Klunne, W. J. (2007). Small hydropower development in africa. *ESI Africa, Issue 2*, (2), 36–37. Retrieved from <http://hydro4africa.net>.
- Kusre, B. C., Baruah, D. C., Bordoloi, P. K., & Patra, S. C. (2010). Assessment of hydropower potential using GIS and hydrological modeling technique in Kopili River basin in Assam (India). *Applied Energy*, 87(1), 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.019>
- León, P., Reinoso, G., Fernando, J., Monroy, M., Fernanda, M., & Jiménez, Z. (2016). Delimitación de regiones hidrológicas en Colombia, 35(1), 1–11.
- Lewis, S. M., Gross, S., Visel, A., Kelly, M., & Morrow, W. (2015). Fuzzy GIS-based multi-criteria evaluation for US Agave production as a bioenergy feedstock. *GCB Bioenergy*, 7(1), 84–99. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12116>
- Liu, H., Esser, L., & Masera, D. (2013). World Small Hydropower Development Report. *Smallhydropowerworld.Org*. Retrieved from http://www.smallhydropowerworld.org/fileadmin/user_upload/pdf/Africa_Western/WSHPDR_2013_Cote_D_Ivoire.pdf
- Martín, D., & Riquelme-santos, J. C. (2018). Knowledge-Based Systems MRQAR : A generic MapReduce framework to discover quantitative association rules in big data problems. *Knowledge-Based Systems*, 153(April), 176–192. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.04.037>
- Martín, D., Rosete, A., Alcalá-Fdez, J., & Herrera, F. (2014). QAR-CIP-NSGA-II: A new multi-objective evolutionary algorithm to mine quantitative association rules. *Information Sciences*, 258, 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.09.009>
- Martínez-Ballesteros, M., Martínez-Álvarez, F., Troncoso, A., & Riquelme, J. C. (2014a). Selecting the best measures to discover quantitative association rules. *Neurocomputing*, 126, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2013.01.056>
- Martínez-Ballesteros, M., Martínez-Álvarez, F., Troncoso, A., & Riquelme, J. C. (2014b). Selecting the best measures to discover quantitative association rules. *Neurocomputing*, 126, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2013.01.056>

- Mata, J., Alvarez, J., & Riquelme, J. (2002). Discovering numeric association rules via evolutionary algorithm. *Advances in Knowledge Discovery and ...*, 40–51. https://doi.org/10.1007/3-540-47887-6_5
- Matteis, Á. F. de. (2003). Geología y Geotecnia Tema : Estabilidad de taludes, 42.
- Mishra, S., Singal, S. K., & Khatod, D. K. (2011). Optimal installation of small hydropower plant - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3862–3869. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.008>
- Moiz, A., Kawasaki, A., Koike, T., & Shrestha, M. (2018). A systematic decision support tool for robust hydropower site selection in poorly gauged basins. *Applied Energy*, 224(April), 309–321. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.070>
- Monk, R., Eng, M., Eng, P., Joyce, S., & Homenuke, M. (2009). Rapid Hydropower Assessment Model - Identify Hydroelectric Sites Using Geographic Information Systems. *Waterpower*, 16, 1–10.
- Morales, S., Álvarez, C., Acevedo, C., Diaz, C., Rodriguez, M., & Pacheco, L. (2015). An overview of small hydropower plants in Colombia: Status, potential, barriers and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1650–1657. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.026>
- Múnera López, L. F. (2011). 12. Potencial Hidroeléctrico de Antioquia - Colombia, 112. Retrieved from www.birdantioquia.org.co
- Navarro Mora, D. C., & Liévano Hurtado, J. M. (2004). Guía Para Estudios De Prefactibilidad De Pch, 1–185.
- Novillo, M., Galarza, L., & Romero, G. (1985). *Manual de Diseño de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. Bucaramanga, Colombia. Retrieved from http://biblioteca.olade.org/iah/fulltext/Bjmbr/v32_2/old0124.pdf
- Ortiz, R. (2011). *Evaluación de Recursos Hidroenergéticos a través de Sistemas de Información Geográfica*. Cali.
- Paish, O. (2002). Small hydro power: Technology and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(6), 537–556. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00006-0](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00006-0)
- Pontificia Universidad Javeriana. (2015). *Atlas de Potencial Hidroenergético de Colombia*. Retrieved from <http://www.upme.gov.co/>
- Punys, P., Dumbrasukas, A., Kvaraciejus, A., & Vyciene, G. (2011). Tools for Small Hydropower Plant Resource Planning and Development: A Review of Technology and Applications. *Energies*, 4(12), 1258–1277. <https://doi.org/10.3390/en4091258>

- Ramirez, M. (2002). Extracción Automática de Redes de Drenaje a partir de Modelos Digitales de Terreno.
- REN21. (2013). *Renewables 2013 Global Status Report. Production*. <https://doi.org/ISBN978-3-9815934-0-2>
- Rojanamon, P., Chaisomphob, T., & Bureekul, T. (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*, 13(9), 2336–2348. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.003>
- Saaty, T. L. (2008). Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process. *Revista de La Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie A. Matemáticas*, 102(2), 251–318. <https://doi.org/10.1007/BF03191825>
- Sahu, S. (2015). *Small hydropower: feasible location, potential and installation in odisha*. National Institute of Technology.
- Schnitzer, V. (2009). Microhydro Power scout guide. *Hydro Power GTZ*, 1–118.
- Serpoush, B., Khanian, M., & Shamsai, A. (2017). Hydropower plant site spotting using geographic information system and a MATLAB based algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 152, 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.095>
- SGC. (2015). MAPA NACIONAL INTEGRADO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA A ESCALA 1:100.000. Retrieved from <https://www2.sgc.gov.co/sgc/mapas/Paginas/Imagenes-de-amenazas-.aspx>
- Soulis, K. X., Manolakos, D., & Anagnostopoulos, J. (2016). Development of a geo-information system embedding a spatially distributed hydrological model for the preliminary assessment of the hydropower potential of historical hydro sites in poorly gauged areas. *Renewable Energy*, 92, 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.013>
- UPME. (2003). Portafolio de Proyectos de Generación Hidroeléctricos entre 10 y 100 MW.
- UPME. (2005). Atlas de Radiación Solar. Retrieved from <http://atlas.ideam.gov.co/presentacion/>
- UPME. (2006). *ATLAS DE VIENTO Y ENERGIA EÓLICA DE COLOMBIA*.
- UPME. (2010). *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia*.

- UPME. (2015). Hidroenergía. In *Atlas de Potencial Hidroenergético de Colombia* (pp. 25–36).
- UPME. (2018). *Informe de registro de proyectos de generación*.
- Upme, & Integral. (2005). Costos Indicativos de Generación Eléctrica en Colombia. *Energy*, 416.
- Vallejos, J., & Bortoni, E. (2015). Determination of hydropower resources using GIS tools : basin of Ypané River, 2, 75–84.
- Voivontas, D., Assimacopoulos, D., Mourelatos, A., & Corominas, J. (1998). Evaluation of renewable energy potential using a GIS decision support system. *Renewable Energy*, 13(3), 333–344. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00006-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00006-8)
- Wali, U. G. (2013). Estimating Hydropower Potential of an Ungauged Stream. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(11), 592–600.
- XM. (2017). Informe de Operación del SIN y Administración del Mercado 2017. Retrieved from <http://informesanuales.xm.com.co/2017/SitePages/operacion/7-1-Precios.aspx>
- Yan, X., Zhang, C., & Zhang, S. (2009). Genetic algorithm-based strategy for identifying association rules without specifying actual minimum support. *Expert Systems with Applications*, 36(2 PART 2), 3066–3076. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.01.028>
- Yi, C.-S., Lee, J.-H., & Shim, M.-P. (2010). Site location analysis for small hydropower using geo-spatial information system. *Renewable Energy*, 35(4), 852–861. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.003>