

Data mining en la selección de proyectos hidroeléctricos en la cuenca Jequetepeque-Zaña, Perú.

Data mining applied to the selection of hydroelectric projects in the Jequetepeque-Zaña basin, Peru.

Leonardo Castillo, M.Sc.¹, Roy Yali, Ing.², and Juan Cabrera, Mg.¹

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú, leonardocastillo@uni.edu.pe, juancabrera@uni.edu.pe

²Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú, ryali93@gmail.com

Resumen– Perú es un país caracterizado por la presencia de la Cordillera de los Andes, cuyas empinadas laderas junto a los procesos lluvia-escorrenría definen un caudal base en los ríos y representan un potencial para el aprovechamiento de la energía hidroeléctrica. De acuerdo con el Plan Nacional de Energía 2014-2025 [3], desarrollado por el Ministerio de Energía y Minería (MINEM), se espera que la demanda peruana de energía crezca entre 4.5 y 6.5 por ciento anual para el 2025, con especial importancia para la planificación. y desarrollo de pequeñas y medianas centrales hidroeléctricas.

Esta investigación evalúa el potencial hidroeléctrico en las cuencas de Zaña y Jequetepeque mediante la aplicación de técnicas de datos espacializados con el fin de localizar áreas con alto potencial de explotación futura de energía hidroeléctrica. Para ello, se aplica y espacializa un modelo hidrológico para determinar el potencial hidroeléctrico a nivel de mallas de 100 m x 100 m; Finalmente, se aplican técnicas de minería de datos como la clasificación para agrupar los valores encontrados en categorías de alto, medio y bajo potencial hidroeléctrico y seleccionar un mejor proyecto.

Los resultados muestran que existe potencial para desarrollar proyectos hidroeléctricos de hasta 219MW, para un desnivel máximo de 503 m, potencia muy superior a las centrales hidroeléctricas existentes de Gallito Ciego y Zaña, las más grandes de la región y que solo alcanzan los 35,3 y 13,2 MW. respectivamente. Los beneficiarios de este proyecto de investigación son el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), instituciones del sector energético (como COES), empresas privadas e, indirectamente, toda la población del país.

Abstract– Peru is a country characterized by the presence of the Andes, whose steep slopes together with the rain-runoff processes define a base flow in the rivers and represent a potential for hydro-energy use. According to the 2014-2025 National Energy Plan [3], developed by the Ministry of Energy and Mining (MINEM), the Peruvian demand for energy is expected to grow between 4.5 and 6.5 percent per year by 2025, with special importance to the planning and development of small and medium-sized hydroelectric plants.

This research evaluates the hydroelectric potential in the Zaña and Jequetepeque basins through the application of spatialized data techniques in order to locate areas with high potential for future exploitation of hydroelectric energy. For this, a hydrological model is applied and spatialized to determine the hydroelectric potential at the level of grids of 100 m x 100 m; Finally, data mining techniques such as classification are applied to group the values found in categories of high, medium and low hydroelectric potential and select a better project.

The results show that there is potential to develop hydroelectric projects of up to 219MW, for a maximum slope of 503 m, power much higher than the existing Gallito Ciego and Zaña hydroelectric plants, the largest in the region and which only reach 35.3 and 13.2 MW respectively. The beneficiaries of this research project are the Ministry of Energy and Mines (MINEM), energy sector institutions (such as COES), private companies and, indirectly, the entire population of the country.

Digital Object Identifier: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.198>
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390
DO NOT REMOVE

Data mining en la selección de proyectos hidroeléctricos en la cuenca Jequetepeque-Zaña, Perú.

Data mining applied to the selection of hydroelectric projects in the Jequetepeque-Zaña basin, Peru.

Leonardo Castillo, M.Sc.¹, Roy Yali, Ing.², and Juan Cabrera, Mg.¹

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú, leonardocastillo@uni.edu.pe, juancabrera@uni.edu.pe

²Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú, ryali93@gmail.com

Resumen– Perú es un país caracterizado por la presencia de la Cordillera de los Andes, cuyas empinadas laderas junto a los procesos lluvia-escorrenría definen un caudal base en los ríos y representan un potencial para el aprovechamiento de la energía hidroeléctrica. De acuerdo con el Plan Nacional de Energía 2014-2025 [3], desarrollado por el Ministerio de Energía y Minería (MINEM), se espera que la demanda peruana de energía crezca entre 4.5 y 6.5 por ciento anual para el 2025, con especial importancia para la planificación. y desarrollo de pequeñas y medianas centrales hidroeléctricas.

Esta investigación evalúa el potencial hidroeléctrico en las cuencas de Zaña y Jequetepeque mediante la aplicación de técnicas de datos espacializados con el fin de localizar áreas con alto potencial de explotación futura de energía hidroeléctrica. Para ello, se aplica y espacializa un modelo hidrológico para determinar el potencial hidroeléctrico a nivel de mallas de 100 m x 100 m; Finalmente, se aplican técnicas de minería de datos como la clasificación para agrupar los valores encontrados en categorías de alto, medio y bajo potencial hidroeléctrico y seleccionar un mejor proyecto.

Los resultados muestran que existe potencial para desarrollar proyectos hidroeléctricos de hasta 219MW, para un desnivel máximo de 503 m, potencia muy superior a las centrales hidroeléctricas existentes de Gallito Ciego y Zaña, las más grandes de la región y que solo alcanzan los 35,3 y 13,2 MW. respectivamente. Los beneficiarios de este proyecto de investigación son el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), instituciones del sector energético (como COES), empresas privadas e, indirectamente, toda la población del país.

Abstract– Peru is a country characterized by the presence of the Andes, whose steep slopes together with the rain-runoff processes define a base flow in the rivers and represent a potential for hydro-energy use. According to the 2014-2025 National Energy Plan [3], developed by the Ministry of Energy and Mining (MINEM), the Peruvian demand for energy is expected to grow between 4.5 and 6.5 percent per year by 2025, with special importance to the planning and development of small and medium-sized hydroelectric plants.

This research evaluates the hydroelectric potential in the Zaña and Jequetepeque basins through the application of spatialized data techniques in order to locate areas with high potential for future exploitation of hydroelectric energy. For this, a hydrological model is applied and spatialized to determine the hydroelectric potential at the level of grids of 100 m x 100 m; Finally, data mining techniques such as classification are applied to group the values found in categories of high, medium and low hydroelectric potential and select a better

Digital Object Identifier: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.168>
ISBN: 978-958-52071-8-9 **ISSN:** 2414-6390
DO NOT REMOVE

The results show that there is potential to develop hydroelectric projects of up to 219MW, for a maximum slope of 503 m, power much higher than the existing Gallito Ciego and Zaña hydroelectric plants, the largest in the region and which only reach 35.3 and 13.2 MW respectively. The beneficiaries of this research project are the Ministry of Energy and Mines (MINEM), energy sector institutions (such as COES), private companies and, indirectly, the entire population of the country.

I. INTRODUCCIÓN

La Política Nacional de Energía 2010-2040 [1] describe como objetivo lograr una combinación de energía diversificada con una creciente porción de energías renovables (donde se encuentran las pequeñas centrales hidroeléctricas), lo que contribuye a reducir las emisiones de carbono. El reporte de la Asociación Internacional de Hidroelectricidad 2018 [2] menciona en 2017, la capacidad instalada del Perú en energía hidroeléctrica aumentó de 200 MW a 5 385 MW, sin embargo, la capacidad potencial total de la energía hidroeléctrica se estima en alrededor de 70 000 MW. Además, el Plan Energético Nacional 2014-2025 desarrollado por el Ministerio de Energía y Minería (MINEM) [3] espera que la demanda peruana de energía crezca entre un 4,5 y un 6,5 por ciento al año para 2025, que será satisfecha principalmente por la energía hidroeléctrica y el crecimiento de otras energías renovables. Por tanto, existe un gran campo de acción en el desarrollo de pequeñas centrales hidroeléctricas (como energías renovables) en un país como el nuestro con gran disponibilidad hídrica y geografía como la Cordillera de Los Andes.

En el Perú, existe una información “base” sobre los cálculos del potencial hidroeléctrico. Lo que se busca es verificar y/o actualizar dicha información para el sector Nor-Pacífico del Perú, empleando modelos hidrológicos y calculando el potencial hidroeléctrico mediante análisis matemático para deducir los patrones y tendencias. Estos patrones y tendencias se pueden recopilar y definir como un modelo de minería de datos (data mining). Los potenciales beneficiarios de este proyecto de investigación son: Ministerio de Energía y Minas (MINEM), instituciones dentro del sector energético (como el COES) y empresas privadas.

A. Antecedentes

A nivel nacional existen estudios y trabajos relacionados al potencial hidroeléctrico en el Perú, como el caso de:

- Evaluación del Potencial Hidroeléctrico Nacional (1979) encargado por el Ministerio de Energía y Minas.
- Atlas del Potencial Hidroeléctrico del Perú (2011) encargado por el Ministerio de Energía y Minas.
- Potencial Hidroenergético en la Zona Norte del Perú (2014) encargado por la Dirección Regional de Energía y Minas de San Martín.
- Determinación de un Portafolio de Proyectos Hidroeléctricos en las Cuencas del Amazonas y Ucayali (2017) encargado por el Ministerio de Energía y Minas.

Estos estudios realizan el cálculo convencional de la potencia hidroenergética en función del caudal (Q) y desnivel (ΔH). En la Tabla I, se observa los valores reportados por el MINEM (1979) como potencial teórico total de la cuenca (PTT) de 125 y 695 MW para las cuencas de Zaña y Jequetepeque respectivamente.

TABLA I
POTENCIAL TEÓRICO TOTAL (PTT)

Cuenca	Zaña	Jequetepeque
Área (Km ²)	2080	4257
Longitud principal (Km)	169	408
Caudal naturalizado (m ³ /s)	9,12	39,77
Caudal medio (m ³ /s)	2,82	30,77
PTT (MW)	125	695

Fuente: MINEM (1979)

En el estudio del MINEM (2011) se incorpora un análisis del potencial con un modelo digital de terreno (MDT) acoplado con modelo hidrológico de mayor extensión en años de registros. Se define adicionalmente el Potencial Teórico Aprovechable y No Aprovechable. El No Aprovechable es todo aquel potencial que se encuentra en áreas de concesión de centrales hidroeléctricas, zonas de amortiguamiento que comprenden las áreas de protección, áreas naturales protegidas de Administración Nacional y Regional. El Potencial Hidroeléctrico Teórico Aprovechable es todo aquel que no se encuentra en áreas restringidas y áreas de concesiones de centrales hidroeléctricas. En la Tabla II se muestra el Potencial Teórico Aprovechable y No Aprovechable para las cuencas de Zaña y Jequetepeque.

TABLA II
POTENCIAL TEÓRICO APROVECHABLE Y NO APROVECHABLE

Cuenca	Zaña	Jequetepeque
Potencial Teórico Total (MW)	145	827
Potencial Teórico Aprovechable (MW)	33	39
Potencial Teórico No Aprovechable (MW)	112	788

Fuente: MINEM (2011)

Ambos estudios iniciales reportan valores cercanos en la determinación del potencial hidroeléctrico con un 23% y 5% de potencia excluida para las cuencas de Zaña y Jequetepeque respectivamente.

B. Objetivos

El objetivo general de la investigación es la selección de proyectos con alto potencial hidroeléctrico en base a las características de cuenca-clima y aplicando técnicas de minería de datos (data mining). Los objetivos específicos se centran en:

- Estudiar los parámetros hidrológicos (precipitación-caudal).
- Determinación del potencial hidroeléctrico mediante uso de datos espacializados.
- Agrupación de sectores (clusterización) potenciales de generación hidroeléctrica.

II. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en el norte de Perú, correspondiente a las cuencas piloto Zaña y Jequetepeque, con áreas 2 080 y 4 275 Km² respectivamente. Las partes altas o cabeceras de cuenca presentan probabilidad del 60% de precipitación según reportes del SENAMHI y afectación/influencia sobre el Fenómeno del Niño. En la Figura 1 se observa el área de estudio delimitado.

Dentro del área de estudio se dispone de dos estaciones de caudales registrados por el Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional (COES) cuyo caudal servirá en el proceso de calibración. De igual forma, se ubican 2 proyectos hidroeléctricos en funcionamiento, Zaña y Gallito Ciego, que pertenecen respectivamente a las cuencas de Zaña y Jequetepeque. La Figura 2 muestra el emplazamiento de estaciones y proyectos hidroeléctricos.

La estación Batán registra un caudal promedio multianual de 7,35 m³/s y un caudal máximo mensual registrados de 96,97 m³/s. La estación QN-501m ubicado aguas arriba del embalse de Gallito Ciego, registra un caudal promedio multianual de 27,63 m³/s y un caudal máximo mensual registrados de 321,45 m³/s.

TABLA III
UBICACIÓN DE PROYECTOS HIDROELÉCTRICOS EXISTENTES

Nombre	C.H. Gallito Ciego	C.H. Zaña
Ubicado dentro de la cuenca	Jequetepeque	Zaña
Empresa	Statkraft S.A.	Electrozaña S.A.C.
Región	Cajamarca	Cajamarca
Provincia	Contumaza	San Miguel
Distrito	Yonan	La Florida
Potencia efectiva (MW)	35,3	13,2

Fuente: MINEM (1979)

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

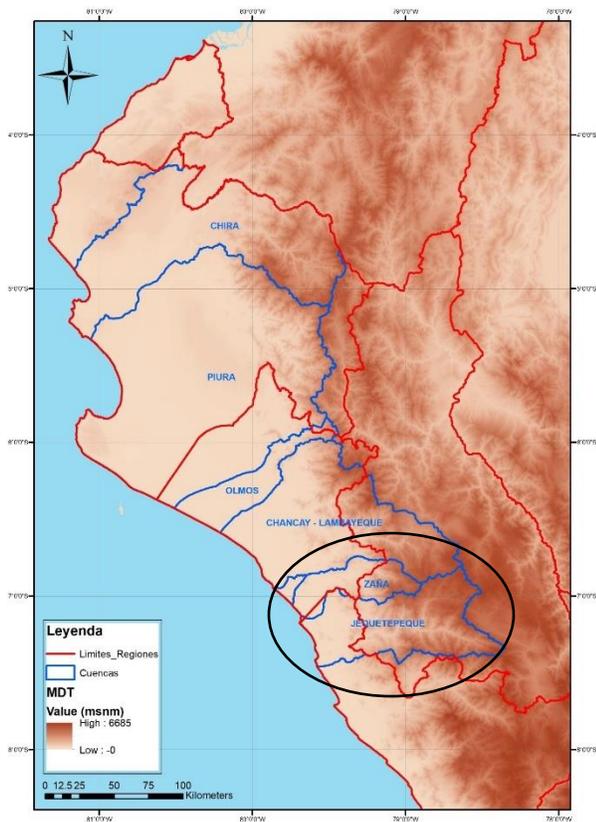


Fig. 1 Ubicación de cuencas costeras en el Norte del Perú

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Base de datos

Por las características de proyecto, fue necesario el uso de información espacializada de diferentes fuentes. La información pluviométrica corresponde a información grillada del Proyecto PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations), descargados de la página del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Esta información tiene una resolución espacial de 0.05° . (~ 5km) y una resolución temporal mínima es de 1 día. El número de curva y el mapa de delimitación de cuencas hidrográficas se obtuvo de la página web de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), el modelo de elevación digital y el mapa de direcciones de flujo se obtuvo del portal Hydrosched. En la Tabla IV se resume la información correspondiente.

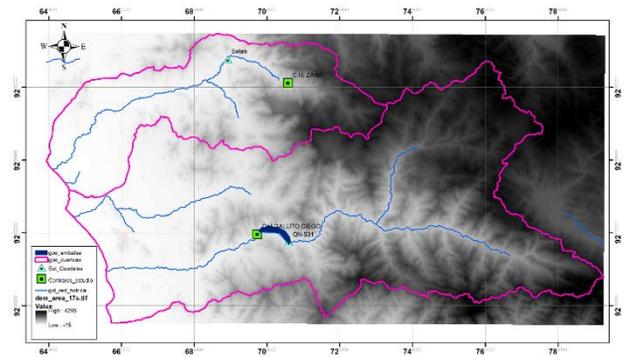


Fig. 2 Ubicación de estaciones de caudales y proyectos hidroeléctricos

TABLA IV
FUENTES DE INFORMACIÓN

Producto	Grilla	Fuente
Precipitación (1981-2017)	5 km	PISCO SENAMHI
Número de curva	-	ANA
Modelo digital de elevación	100 m	HYDROSHED
Dirección de flujo	100 m	HYDROSHED
Delimitación de cuencas	-	ANA
Caudales – Est. Batán y QN-504	mes	COES y SENAMHI

B. Metodología

La determinación del potencial hidroeléctrico parte del supuesto de proponer centrales de tipo fluyente, sin almacenamientos, debido a la gran variedad de escenarios posibles que se presentarían si se incluyesen estos.

Bajo esta consideración, se propone el análisis del potencial hidroeléctrico para cuatro configuraciones de centrales hidroeléctricas con las siguientes características:

- Toma de agua del cauce, derivación superficial y descarga de aguas turbinadas a una distancia de 5 Km aguas abajo del punto de toma.
- Toma de agua del cauce, su derivación superficial y descarga de aguas turbinadas a una distancia de 1 Km aguas abajo del punto de toma.
- Toma de agua del cauce, derivación superficial y descarga de aguas turbinadas a una distancia de 500 m aguas abajo del punto de toma.
- Toma de agua del cauce, derivación por gravedad desarrollada de 1 km y descarga de aguas turbinadas respecto a un máximo desnivel.

En la Figura 3 se muestran las configuraciones a evaluar.

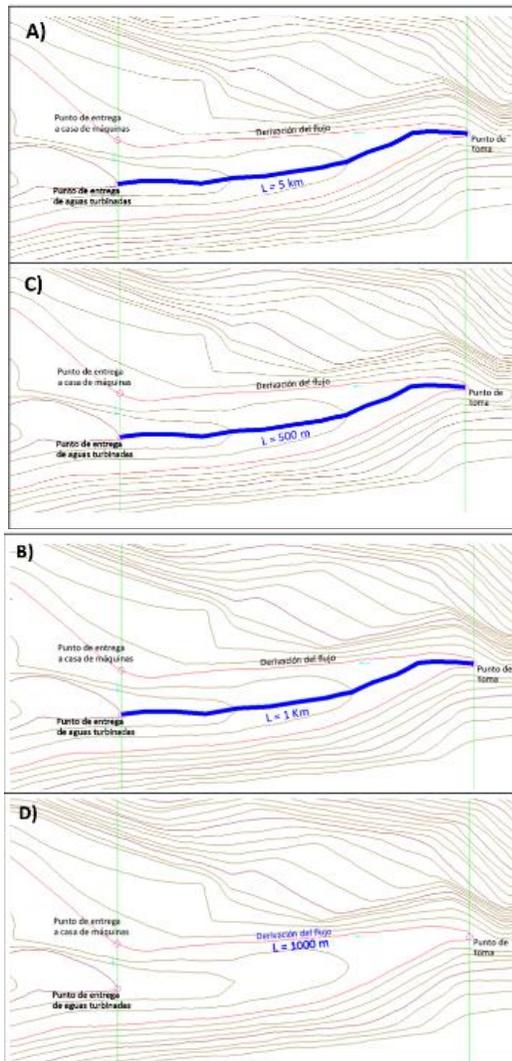


Fig. 3 Escenarios considerados para la determinación del potencial hidroeléctrico. A) Distancia de cauce principal a 5 km aguas abajo. B) Distancia de cauce principal a 1 km aguas abajo. C) Distancia de cauce principal a 500 m aguas abajo. D) Distancia de la derivación de 1 km

El primer paso consiste en procesar el Modelo Digital de Elevación (MDT) para reducir la escala a grillas de 100mx100m, y generar archivos de Dirección del flujo y Acumulación de flujo a la misma escala.

Para estimar la escorrentía acumulada en cada grilla, se utilizó el modelo de Curva Número, desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos. Este modelo requiere como datos de ingreso la precipitación y un coeficiente denominado Número de Curva [4], que representa las abstracciones de la cuenca. El cálculo de la escorrentía mensual se estima como:

$$Q = \frac{(P-Ia)^2}{(P-Ia+S)} \quad (1)$$

Donde Q=escorrentía mensual (mm), P=precipitación promedio mensual (mm), S= retención máximo potencial, $Ia=0.2S$ como abstracción inicial (mm). La retención máxima potencial (S) se define en función del CN como:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

Donde CN=Número de Curva que depende del suelo hidrológico y tipo de suelo, uso de tierras, cobertura y condiciones de antecedente de humedad. Para el caso de Perú, se cuenta con el mapa de CN publicado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

Los caudales simulados con el modelo fueron calibrados con los registros históricos de caudales de las estaciones Batán y QN-501.

Asimismo, en base a las distancias de evaluación consideradas en las configuraciones descritas en la Fig. 3, se estimaron las caídas (ΔH) utilizando el MDT con grillas de 100mx100m. La Fig. 4 resume los pasos y procedimientos seguidos para la obtención de las descargas para cada configuración y cada punto de las cuencas en análisis.

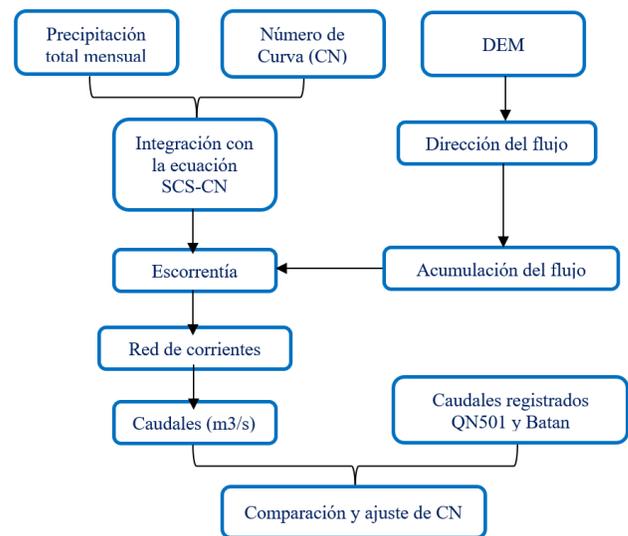


Fig. 4 Diagrama de flujo del modelamiento hidrológico y calibración

En una segunda etapa, se procedió a evaluar el potencial hidroeléctrico. El potencial hidroeléctrico es una medida de los recursos hídricos disponibles en un sistema fluvial para la producción de energía. La definición de Potencial hidroeléctrico Técnico (PHT) considera que un caudal a un 95% de persistencia escurre y es capaz de generar electricidad en función del desnivel de este, con un 100% de eficiencia. El procedimiento para la estimación de caudales con una persistencia del 95% se presenta en la Fig.5.

A continuación, mostramos los diagramas de flujo que fueron empleados y procesados en algoritmos R y Python.

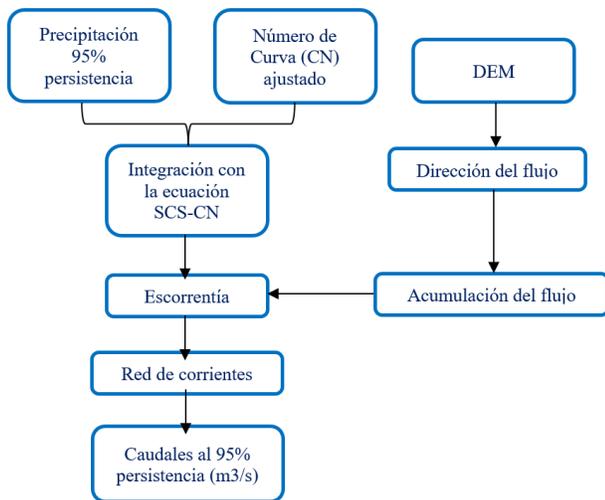


Fig. 5 Diagrama de flujo del potencial hidroeléctrico para escenarios A, B y C

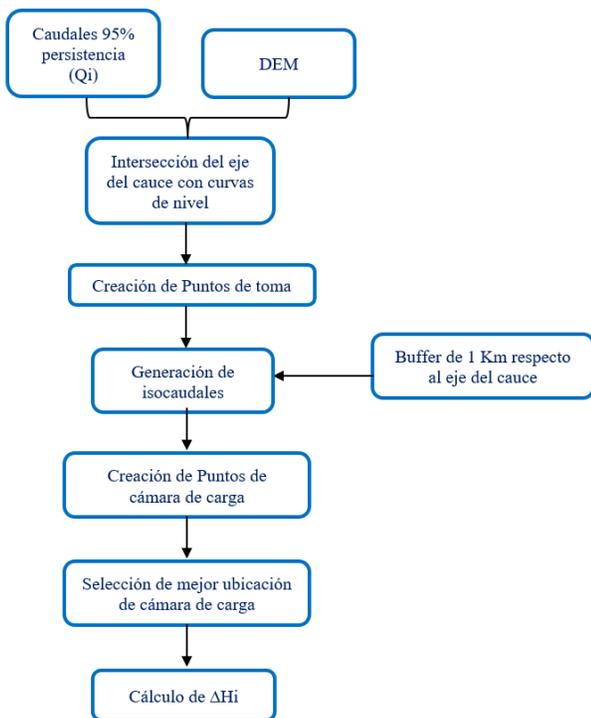


Fig. 6 Diagrama de flujo del potencial hidroeléctrico para escenario D

El PHT es calculado como la suma del potencial correspondiente a cada tramo de un curso de agua, que se inicia y termina en un nodo.

$$[PHT] = \sum \gamma \cdot Q_i \cdot \Delta H_i / 1000000 \quad (3)$$

Donde:

Peso específico = 9810 N/m³

Q_i = caudal ofertado para un 95% de persistencia, en m³/s
 ΔH_i = desnivel generado para una longitud L tipo cascada, en m.

PHT_i = potencial hidroeléctrico técnico en MW

Finalmente, con los valores de potencial hidroeléctrico anual en puntos a lo largo de toda la cuenca, se procedió a clasificarlos de acuerdo con las siguientes categorías: ALTO, con saltos de gran altura mayores a 50 m; MEDIO, con saltos de mediana altura de 15 m a 50 m; y, BAJO, con saltos menores a 15 m.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 7 y 8 se muestran los caudales a nivel mensual para Numero de Curva mínimo, máximo y valores registrados de estaciones QN-501 y Batán respectivamente. El proceso de calibración consistió en evaluar distintos CN en un rango de mínimo y máximo y evaluar cual curva se ajusta mejor a la serie de caudales mensuales registrados. Este procedimiento se realizó para ambas estaciones de Batán y QN-504.

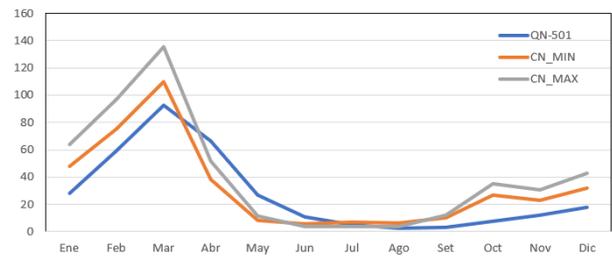


Fig. 7 Generación de caudales y comparación de resultados con la estación QN-504

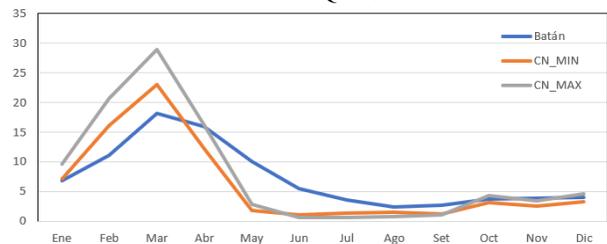


Fig. 8 Generación de caudales y comparación de resultados con la estación Batán

Se observa que el mejor ajuste del Número de Curva se da para valores mínimos de CN dentro del rango y zonificación propuesta por la ANA. En la Figura 9 se observa el mapa espacial de valores de CN ajustado. Los valores varían de CN de 39 a 81.

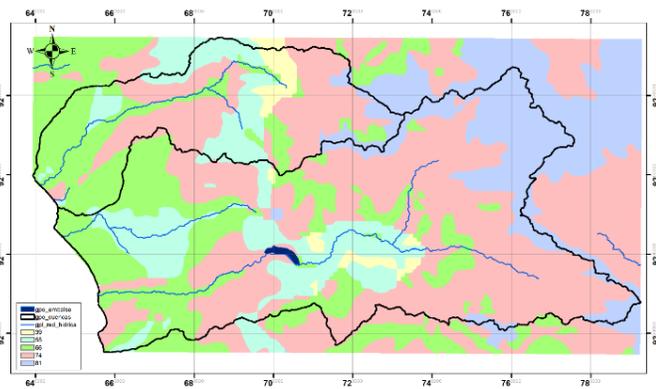


Fig. 9 Mapa de Número de Curva (CN) ajustado para las cuencas Zaña y Jequetepeque

Con los CN ajustados, se procedió a calcular los caudales ofertados para una persistencia al 95%. Dicho caudal es requerido para la estimación del potencial hidroeléctrico. En la Figura 10 se muestra el mapa de caudales (Q95%) acumulados para el mes de marzo.

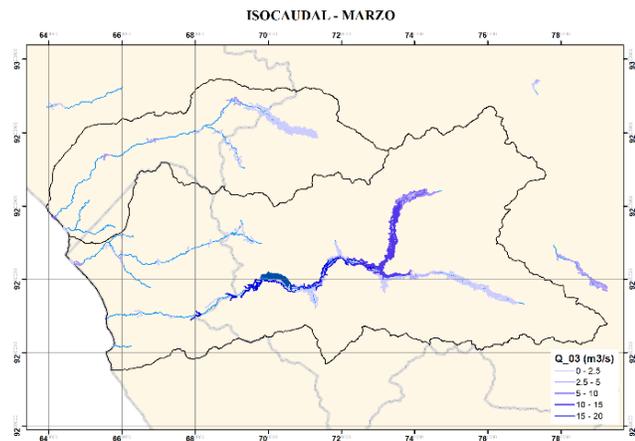


Fig. 10 Mapa de caudales Q95% para el mes promedio multianual de marzo

Para los escenarios A, B y C, los desniveles (ΔH) son determinados en función de una longitud (L) con respecto al punto de toma ubicado en el cauce principal. En la Figura 11 se observa los puntos identificados de proyectos con grandes saltos (mayor a 50 m), mediana altura (de 15 a 50 m) y de pequeña altura (menores a 15 m) correspondiente a una longitud o división de cauce cada 5 000 m. Se observa que los proyectos de centrales hidroeléctricas de gran altura se ubican por encima de la cota de 300 m.s.n.m., con un mayor desnivel (570 m) ubicado a una cota de toma de 2 633 m.s.n.m y con un caudal máximo de 8,86 m³/s.

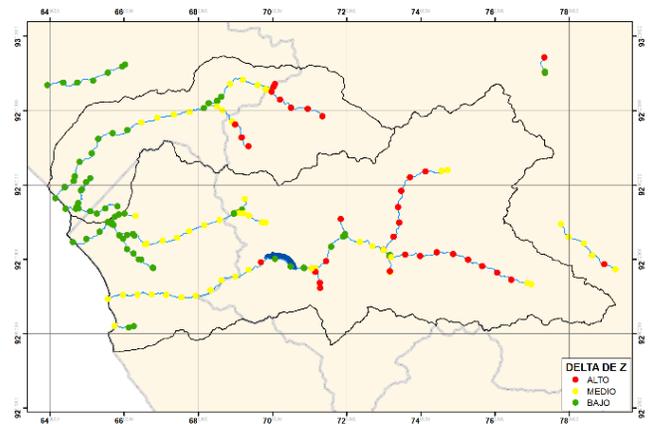


Fig. 11 Resultados Potencial hidroeléctrico Escenario A (L=5 km)

De esta forma, los proyectos clasificados como “ALTO” suman un potencial hidroeléctrico teórico de 1 288,6 MW; sin embargo, este valor debe ser ajustado potenciado con las centrales con mayor a 10 MW. Finalmente, el potencial hidroeléctrico es de 1 231 MW para puntos de toma cada 5 000 m. Para este escenario, el mayor potencial registrado en un solo proyecto es de 214,2 MW para un punto de toma en la cota de 2 633 ms.n.m.

En la Figura 12 se observa los puntos identificados de proyectos correspondiente a una longitud o división de cauce cada 1 000 m. Se observa que los proyectos de centrales hidroeléctricas de gran altura se ubican por encima de la cota de 491 m.s.n.m y se concentran en cursos principales en la parte alta dentro de las cuencas de Jequetepeque y Zaña. El proyecto con mayor desnivel (193 m) se ubica a una cota de toma de 1 230 m.s.n.m con un caudal máximo de 10,9 m³/s.

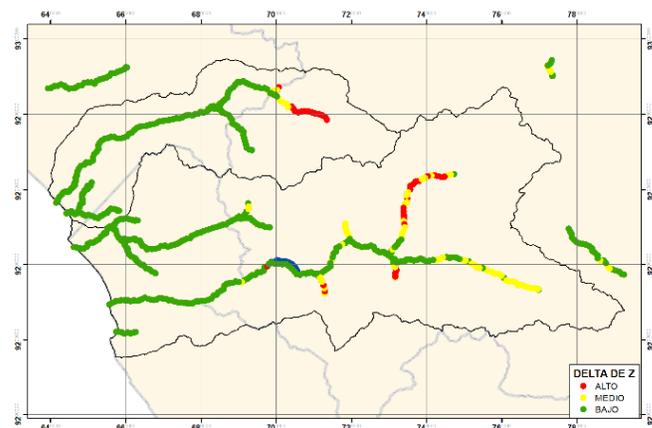


Fig. 12 Resultados Potencial hidroeléctrico Escenario B (L=1 km)

Se observa que todos los proyectos clasificados como “ALTO” suman un potencial hidroeléctrico teórico de 767,7 MW. Sin embargo, este valor debe ser ajustado potenciado con las centrales con mayor a 10 MW. Finalmente, el potencial hidroeléctrico es de 678,2 MW para puntos de toma cada 1000

m. Para este escenario, el mayor potencial estimado en un solo proyecto es de 88,2 MW para un punto de toma en la cota de 1 230 m.s.n.m.

En la Figura 13 se observa los puntos identificados de proyectos correspondiente a una longitud o división de cauce cada 500 m. Lo más resaltante, es que los proyectos de centrales hidroeléctricas de gran altura se ubican por encima de la cota de 625 m.s.n.m y se concentran en cursos principales en la parte alta dentro de las cuencas de Jequetepeque y Zaña. De los proyectos, la que presenta mayor desnivel o salto (159 m) se ubica a una cota de toma de 1 196 m.s.n.m con un caudal máximo de 10,9 m³/s.

Se observa que todos los proyectos clasificados como "ALTO" suman un potencial hidroeléctrico teórico de 450,2 MW. Sin embargo, este valor debe ser ajustado potenciado con las centrales con mayor a 10 MW. Finalmente, el potencial hidroeléctrico es de 411,8 MW para puntos de toma cada 500 m. Para este escenario, el mayor potencial estimado en un solo proyecto es de 72,7 MW para un punto de toma en la cota de 1 196 m.s.n.m.

Los resultados del escenario D que captan aguas del río (bocatoma) y se derive el flujo por conducción (tipo canal) hasta la cámara de carga y por desnivel se instale una tubería forzada hasta un punto en el río (casa de máquinas), presentan un desnivel máximo de 520 m con caudal de 6.39 m³/s. Este proyecto tiene una cota de toma en 2 500 m.s.n.m.

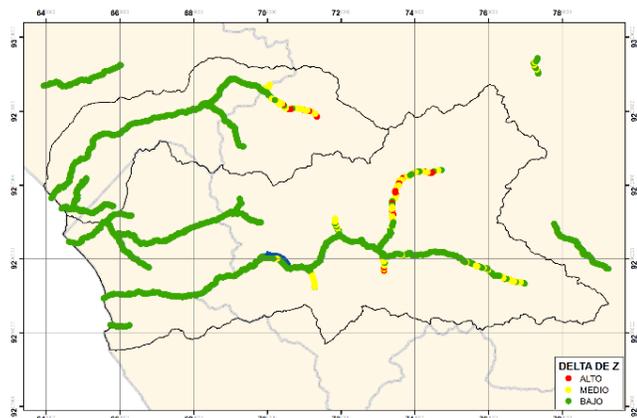


Fig. 13 Resultados Potencial hidroeléctrico Escenario C (L=500 m)

Del total de 168 proyectos bajo este escenario clasificados como ALTO, el mayor potencial dado en un solo proyecto es de 219.09 MW para un punto de toma en la cota de 1 400 m.s.n.m.

Se observa un mejor comportamiento y obtención de mayores potenciales hidroeléctricos del Escenario D sobre los Escenarios A, B y C, por ello, con fines de priorizar proyectos se analizan los 167 proyectos (en base al comportamiento de caudales mensuales, desniveles y potenciales hidroeléctricos) para mediante clusters adoptar un grupo de proyectos priorizado. Se procedió a realizar un dendograma obtenido del

análisis con R Studio mediante el método Ward como criterio de análisis de clúster jerárquico [5].

Las técnicas de minería de datos y sus aplicaciones son amplias y son la tendencia para desarrollar habilidades y un mejor entendimiento del problema y clasificación [6]. Los variables consideradas para el análisis de jerarquización son los caudales de generación, desniveles y valores de potencial hidroeléctrico.

Los resultados muestran un grupo de 6 proyectos que se encuentran agrupados y que suman un potencial hidroeléctrico técnico de 687,2 MW para las cuencas del Zaña y Jequetepeque. Mayor detalle ver Tabla V.

TABLA V
POTENCIAL TEÓRICO APROVECHABLE Y NO APROVECHABLE

ID	Z_TOMA	Z_RIO	ΔH	Q prom	PHT
	m.s.n.m.	m.s.n.m.	m	m ³ /s	MW
ID0204_2	450	291	159	8,84	165,51
ID0058_1	600	429	171	7,71	155,27
ID0074_2	700	530	170	6,78	135,72
ID0142_3	500	408	92	8,16	88,42
ID0202_1	350	283	67	9,44	74,43
ID0074_1	700	615	85	6,78	67,86

V. CONCLUSIONES

La metodología propuesta mostró ser adecuada para el planteamiento de probables proyectos hidroeléctricos dentro de las cuencas de Zaña y Jequetepeque. Se ha realizado un modelamiento hidrológico calibrado para la obtención del caudal disponible y un análisis de modelo de terreno digital para la obtención de escenarios de caídas o desniveles para la formulación del potencial hidroeléctrico.

El presente documento presenta alternativas de proyectos viables en base a una disponibilidad hídrica, desnivel y zonas clasificadas como alto, medio y bajo potencial hidroeléctrico. Para la selección priorizada, se aplicaron técnicas de minería de datos que son adecuadas para un conjunto de datos espacializados como el caso de caudales, desniveles y valores de potencial hidroeléctrico.

Dentro de las técnicas de clasificación, el dendograma codificado en código R permitió la separación de los clúster o clases para la selección de 6 proyectos prioritarios.

Los resultados indican un conjunto de proyectos a lo largo de los cauces principales de la cuenca, sin embargo, se ha identificado que existen grupos que presentan un mismo comportamiento en caudales, desniveles y potenciales hidroeléctricos. Un grupo priorizado de proyectos que deben ser evaluadas desde el punto de vista económico y factibilidad son 6 proyectos que suman un potencial hidroeléctrico técnico de 687,2 MW.

Se recomienda continuar la evaluación en una segunda etapa con la incorporación de variables económicas y ambientales para la selección técnicas de proyectos.

Los resultados mostrados servirán de base para una planificación del desarrollo hidroenergético a futuro del país.

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento al Vicerrectorado de Investigación (VRI) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) por su apoyo a las actividades de investigación en el campo del agua y energía.

REFERENCIAS

- [1] OSINERGMIN, “Aprueban la Política Energética Nacional del Perú 2010-2040”, 2010. <http://www2.osinerg.gob.pe/MarcoLegal/docrev/DS-064-2010-EM-CONCORDADO.pdf>
 - [2] International Hydropower Association, “2018 Hydropower Status Report”, 2018. <https://www.hydropower.org/publications/2018-hydropower-status-report>
 - [3] MINEM, “Plan Energético Nacional 2014-2025”, 2014. <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/2ResEje-2014-2025%20Vf.pdf>
 - [4] Indrajeet Sahu, and A.D. Prasad, “Assessment of Hydro Potential Using Integrated Tool in QGIS” ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volumen IV-5, 2018.
 - [5] Fionn Murtagh, and Pierre Legendre, “Wards Hierarchical Agglomerative Clustering Method: Which Algorithms Implement Wards Criterion?” *Journal of Classification*, vol. 31, pp. 274-295, 2014.
- Shu-Hsien Liao, Pei-Hui Chu and Pei-Yuan Hsiao, “Data mining techniques and applications – A decade review from 2000 to 2011” *Expert Systems with Applications*, vol. 39, pp. 11303-11311, 2012.