

SINERGIA AGUAS RESIDUALES – ENERGÍA: MÉTODO DE APROXIMACIÓN AL CÁLCULO DEL POTENCIAL HIDROENERGÉTICO DE AGUAS RESIDUALES DE ECUADOR

*SYNERGY WASTEWATER – ENERGY: METHOD OF APPROXIMATION FOR CALCULATION
ECUADOR'S HYDROPOWER POTENTIAL OF WASTEWATER*

Diego Esteban Teca ¹, Leandro Gabriel Álvarez Samaniego ², Efraín Antonio Dominguez Calle ³

Recibido: 14/12/2021 y Aceptado: 17/03/2022
ENERLAC. Volumen VI. Número 1. Junio, 2022 (22 - 48)
ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)



Foto de Tom Fisk en Pexels.

1 Landfillsolutions. Ecuador.
diegotk_2005@yahoo.com
<https://orcid.org/0000-0003-1585-0940>

2 Proexponente S.A. Ecuador.
leandroalvarez@idpayer.com
<https://orcid.org/0000-0002-8906-5980>

3 (†) 16 de mayo, 2021. Universidad Javeriana. Colombia.
Colaborador de la investigación en la fase de tutoría.

RESUMEN

En Ecuador la demanda actualizada de energía es 40,009 GWh. Esta demanda posee crecimiento promedio proyectado entre el periodo 2010-2022 de 7.8%. La matriz eléctrica del país estima una generación del 90% de energía hidráulica. La creciente demanda de energía ha provocado aumento de embalses para generación hidroeléctrica. El Plan Maestro de Electrificación 2013-2022 estima la implementación de 25 centrales hidroeléctricas con una potencia de 4,170 MW. Se considera como ventaja de estos proyectos la generación de energía renovable (ER) y como desventaja la transformación de ecosistemas. Una forma de disminuir esta desventaja es impulsar proyectos de gestión ambiental de aguas residuales (AR) con generación de ER. Esta investigación identifica lugares factibles para implementar proyectos de energía renovable (PER), expone un método para estimar el potencial hidroenergético de aguas residuales (PHAR). Se seleccionaron ciudades andinas cabeceras cantonales, desniveles topográficos de 60 metros o más y caudales medios de generación de AR. Este trabajo servirá de apoyo para un acercamiento práctico al cálculo

del PHAR, no desarrollado de manera amplia en el país. Este potencial contribuirá como instrumento de gestión ambiental para las futuras necesidades energéticas, la implementación de PER y apoyar al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Palabras clave: Energía renovable, Proyectos de Energía Renovable, Aguas Residuales, Potencial Hidroenergético, SIG-Sistema de Información Geográfico, PyQGIS.

ABSTRACT

In Ecuador, the updated energy demand is 40,009 GWh. This demand has projected an average growth between the 2010-2022 period of 7.8%. The country's electricity matrix estimates a generation of 90% of hydraulic energy. The growing demand for energy has led to an increase in reservoirs for hydroelectric generation. The 2013-2022 Electrification Master Plan estimates the implementation of 25 hydroelectric plants with a power of 4,170 MW. Renewable energy (RE) generation is seen as an advantage

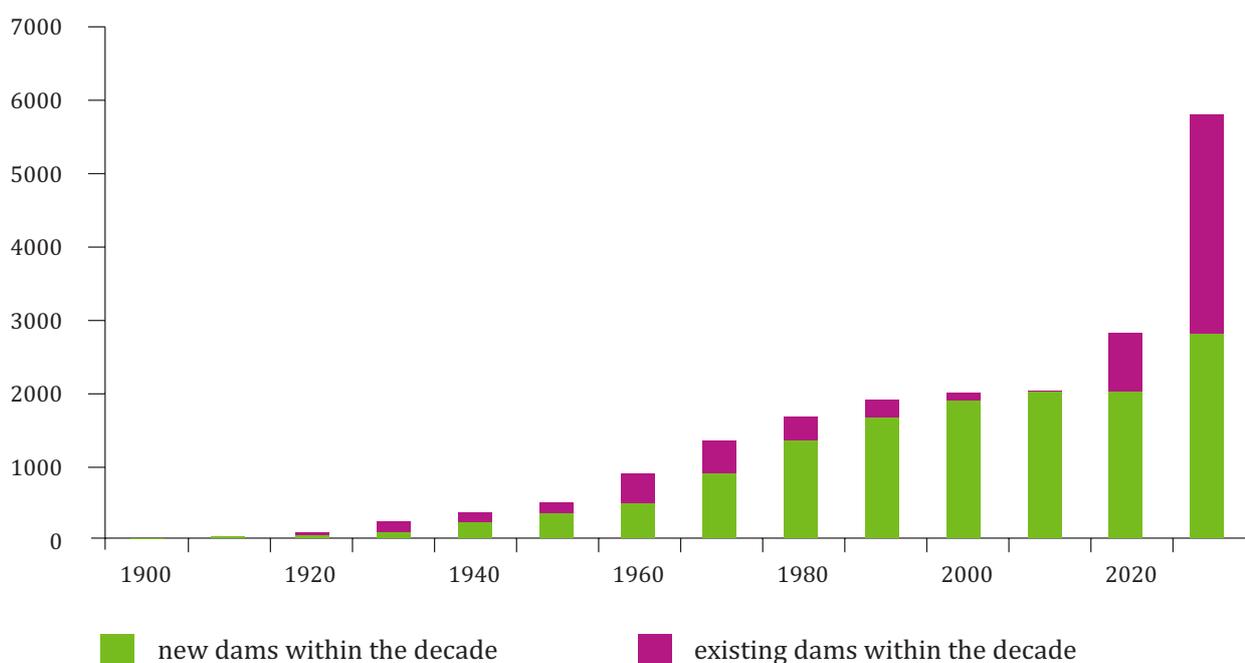
of these projects and the transformation of ecosystems as a disadvantage. One way to reduce this disadvantage is to promote wastewater environmental management (AR) projects with the generation of RE. This research identifies feasible places to implement renewable energy projects (PER), and exposes a method to estimate the hydro-energy potential of wastewater (PHAR). Andean cities with cantonal headwaters, topographic slopes of 60 meters or more, and average RA generation flows were selected. This work will support a practical approach to the calculation of the PHAR, little developed in the country. This potential will contribute as an environmental management instrument for future energy needs, the implementation of the PER and will support the fulfillment of the Sustainable Development Goals (SDG).

Keywords: *Renewable Energy, Renewable Energy Projects, Wastewater, Hydropower Potential, GIS-Geographic Information System, PyQGIS.*

INTRODUCCIÓN

El agua y la energía son recursos básicos naturales y estratégicos. Constituyen la base de la forma de vida de la sociedad humana contemporánea y proporcionan una garantía importante para el desarrollo sostenible de la economía nacional. La principal fuente en Ecuador es la energía hidroeléctrica, lo que requiere la construcción de grandes proyectos de infraestructura (Pase et al., 2016); (Yin et al., 2018). El desarrollo mega hidráulico reciente y en curso en el sur global implica profundas transformaciones socio-técnicas, ecológicas, territoriales y culturales en diferentes niveles y espacios de la sociedad (Teräväinen, 2019). Al menos 3,700 centrales hidroeléctricas con represas, cada una con una capacidad de más de 1 MW, están planificadas o en construcción en países con economías emergentes (Zarfl et al., 2014) (Figura 1).

Figura 1. Ritmo global de construcción de presas hidroeléctricas, presas hidroeléctricas existentes y perspectivas para presas hidroeléctricas en construcción o planificadas



Fuente: (Zarfl et al., 2014).

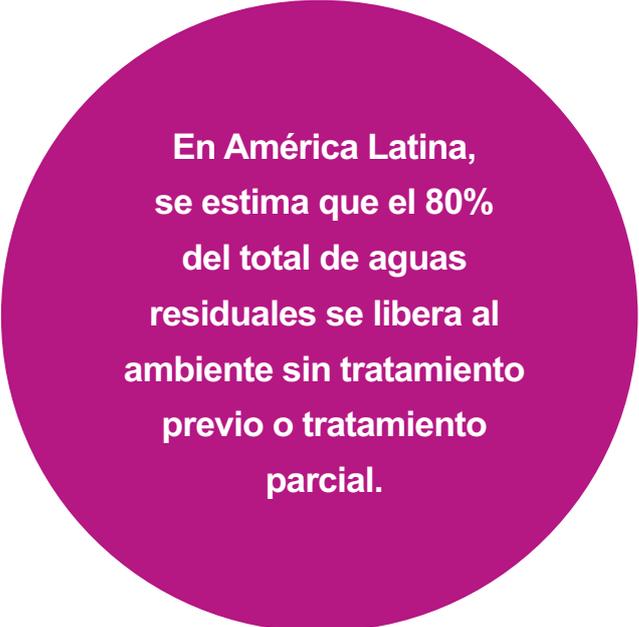
Se estima que el potencial hidroenergético de Ecuador, calculado con caudales medios mensuales de los cauces de aguas¹ con mayor potencial hidroenergético, oscila alrededor de 91000 MW. El potencial aprovechable factible de manera técnica, en 11 cuencas hidrográficas, oscila alrededor de 31,000 MW (MEER, 2016).

La energía hidroeléctrica abarca soluciones tales como centrales con presas o embalses, centrales a filo de agua o agua fluyente y centrales de canal flotantes o sumergidas (Turconi et al., 2013). Los conflictos entre ambiente y proyectos de energía renovable (PER), proyectos hidroeléctricos, son inevitables en países que presionan para cumplir los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) con la implementación de esta gran infraestructura (Jackson, 2011). La expansión de mega emprendimientos, pone bajo control de grandes empresas extensas porciones de bienes comunes que se encuentran en determinados territorios. (Vallejo et al., 2019).

En América Latina, se estima que el 80% del total de AR² se libera al ambiente sin tratamiento previo o tratamiento parcial (Connor et al., 2018). Además, la gran cantidad de AR impulsadas por el rápido crecimiento de la población, urbanización, mejora de las condiciones de vida y desarrollo económico, contribuyen a la transformación del ambiente (Da Rocha et al., 2015). Lo descrito se traduce en contaminación tanto de aguas superficiales y subterráneas como de suelos, provocando problemas sobre la salud de la población y de los ecosistemas (Connor et al., 2018); (UNESCO, 2017); (Nieves et al., 2012); (Azqueta et al., 2007). No realizar gestión ambiental a las AR en entidades territoriales se traduce en imposibilidad de imple-

mentar estrategias de generación de ER. Estrategias enmarcadas en el cumplimiento de los ODS de la Agenda 2030, objetivos que pueden proporcionar un paradigma renovado y holístico para la concepción de desarrollo (Fan et al., 2019).

En un mundo donde la demanda de agua dulce está en constante aumento y los escasos recursos hídricos se ven cada vez más exigidos por la captación excesiva, la contaminación y el cambio climático (CC), sería impensable no aprovechar las oportunidades que brinda una mejor gestión ambiental de las AR (UNESCO, 2017). De acuerdo con las demandas de ahorro de energía y reducción de emisiones GEI, el nexo agua-energía se ha convertido en una gran preocupación a nivel mundial (Da Rocha et al., 2015); (Yin et al., 2018). Utilizar AR en PER puede incentivar la implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), que son un ejemplo de la sinergia y el nexo entre AR y energía (Kilkiş et al., 2018). Algunos PER instalados en sistemas de tratamiento de AR a nivel mundial se los puede ver en la Tabla 1.



**En América Latina,
se estima que el 80%
del total de aguas
residuales se libera al
ambiente sin tratamiento
previo o tratamiento
parcial.**

1 Los principales cauces de agua con mayor potencial hidroenergético en Ecuador son los ríos: Napo, Esmeraldas, Coca, Pastaza, Zamora y Puyango (MEER, 2016).

2 Residuos líquidos generados por la población (descargas domésticas) y actividades productivas (descargas comerciales e industriales).

Tabla 1. Inventario de centrales hidroeléctricas en sistemas de AR (países con datos disponibles)

Nombre	País	Tipo de operación	Equipo	Potencia instalada (kW)	Altura (m)	Flujo de diseño (m ³ /s)	Longitud de la compuerta (m) y diámetro (mm)
Aïre, Geneve	CH	DTE	Kaplan turbine	200	5	3.2	N/A
As Samra	JO	USW	2 Pelton turbines	2 x 800	104	3.2	N/A; 1,500
As Samra	JO	DTE	2 Francis turbines	2 x 840	41	3.2	Ca. 200; 2,000
Deer Island, Boston	USA	DTE	2 Kaplan turbines	2 x 1,000	8.8	2 x 13.1	-
Elsholt	E	USW	2 Archimedes screws	2 x 90	N/A	2.6	2,600
Emmerich	D	DTE	Archimedes screw	13	3.8	0.4	1,200
Engelberg	CH	DTE	Pelton turbine	50	54.4	0.16	Ca. 67; N/A
Grächen	CH	DTE	Pelton turbine	262	365	0.09	Ca. 830; 300
Hsinchu	T	DTE	N/A	11	N/A	N/A	N/A
La Asse, Nyon	CH	DTE	Pump as turbine	220	94.25	0.3	Ca. 3,515; 600
La Douve I, Leysin	CH	DTE	Pelton turbine	430	545	0.08	Ca. 1,256; N/A
La Douve II, Leysin	CH	DTE	Pelton turbine	75	83	0.11	N/A
Morgental, St.Gallen	CH	DTE	Pelton turbine	1,350	190	0.84	Ca. 4,800; 800
North Head, Sydney	AUS	DTE	Kaplan turbine	4,500	60	3.5	-
Point Loma, San Diego	USA	DTE	Francis turbine	1,350	27	7.6	Ca. 7,200; N/A
Profay, Le Chable	CH	USW	Pelton turbine	350	449	0.1	Ca. 2,290; 300
Taichung	T	DTE	N/A	68	N/A	N/A	N/A

CH-Suiza, JO-Jordania, USA-Estados Unidos de América, D-Alemania, T-Taiwán, AUS-Australia, E-Inglaterra; USW-AR aguas arriba; DTE-Efluente tratado aguas abajo; N/A-Datos no disponibles.

Fuente: Elaboración propia con los datos del estudio de (Bousquet et al., 2017).

Suiza es el país con más instalaciones de turbinas Pelton que generan ER con AR ya tratadas en una PTAR, las cuales son la tecnología más utilizada en PER con AR, centrales hidroeléctricas (Bousquet et al., 2017).

El tratamiento deficiente de AR y la seguridad del agua potable a largo plazo son los principales desafíos del agua en Ecuador. Estos pueden verse en peligro debido a la rápida urbanización, desarrollo urbano y la presión económica de las ciudades, que han impulsado una mayor generación de AR y mayor demanda de energía para la gestión de las mismas (Schreurs et al., 2018). Satisfacer la demanda de servicios de saneamiento requiere cantidades significativas de energía para recolectar, tratar y descargar las AR. Estos servicios se encuentran entre los mayores consumidores de energía en municipios, regiones y países (Xue et al., 2016). Los principales centros urbanos y fuente de contaminación de las subcuencas de los ríos andinos de Ecuador son las ciudades cabeceras cantonales. La población de estas ciudades se establece en los márgenes de los principales cauces de agua andinos. Si bien hoy se asocia a los ríos andinos de Ecuador como el transporte de los desechos de las urbes, en época colonial eran vergeles, playas, sitios de molinos y de huertas, espacio para el trabajo de lavanderas y para bañistas. Es decir, constituían un recurso destinado a actividades absolutamente diferentes a la realidad contemporánea (EPMAPS, 2014). El tratamiento de los desechos líquidos urbanos e industriales en Ecuador es casi inexistente (apenas un 7%). Las cabeceras cantonales descargan sin tratamiento o tratamiento parcial las AR domésticas, comerciales e industriales hacia los ríos afluentes y quebradas tributarias de las arterias principales de las cuencas de drenaje (CEPAL, 2011).

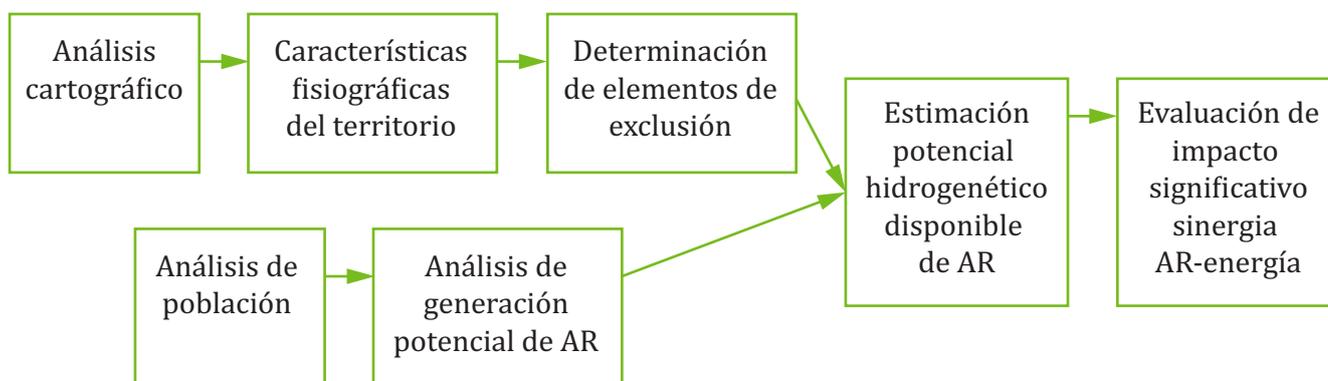
El área de estudio se localiza en Ecuador, en las ciudades andinas cabeceras cantonales de Tulcán, Ibarra, Quito, Latacunga, Ambato, Riobamba, Guaranda, Cuenca y Loja. Ciudades que se encuentran inmersas en las subcuencas

hidrográficas de los ríos Carchi, Guayllabamba, Mira, Patate, Chambo, Yaguachi, Upano y Zamora, ubicadas a una altitud mayo a los 2000 msnm. El objetivo de esta investigación es proponer un método para estimar el PHAR, como instrumento de gestión ambiental de AR para el aporte a las necesidades futuras de energía de Ecuador y/o como incentivo para el desarrollo de PTAR. La investigación apunta a responder la siguiente pregunta: ¿Cómo el aprovechamiento de AR para generar ER puede transformarse en un instrumento de gestión ambiental? La respuesta a esta pregunta muestra como el nexo estratégico AR-ER puede contribuir a satisfacer algún porcentaje de la demanda futura de energía de Ecuador.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño metodológico de la investigación posee tres fases con sus respectivas actividades y productos. Este diseño se planteó con fases consecutivas, en el que cada producto de la fase anterior sea insumo para la siguiente fase. Primero se desarrolló la fase 1, que posee tres actividades: análisis cartográfico, identificación de las características fisiográficas del territorio y determinación de elementos de exclusión, para identificar los lugares factibles en las subcuencas hidrográficas de Ecuador para implementar PER. Luego de identificar los lugares con sus respectivas caídas hidráulicas, se desarrolló la fase 2 para estimar el PHAR de ciudades de Ecuador, mediante tres actividades: análisis de población, análisis de generación potencial de AR y estimación potencial hidroenergético disponible de AR. El resultado principal de esta fase es el mapa de PHAR para aprovechamiento eléctrico de Ecuador, inventario hidroenergético de AR. Por último, se desarrolló la fase 3 que posee una actividad: evaluación de impacto significativo sinergia AR-energía, evaluar de manera económica los posibles PER a implementar vinculados a la sinergia AR-ER (Tabla 2). En la figura 2, se presenta el diagrama metodológico de la investigación.

Figura 2. Diseño metodológico de la investigación



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Diseño metodológico de la investigación

Fases	Actividades	Productos
1. Identificación de lugares factibles en las subcuencas hidrográficas de Ecuador para implementar PER.	1.1 Análisis cartográfico	Mapas de delimitación de afluentes y drenajes menores de las subcuencas hidrográficas y cartografía básica.
	1.2 Identificación de las características fisiográficas del territorio	Mapas de elevación con base en el modelo de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés): DEM ALOS PALSAR 12.5m x 12.5m.
	1.3 Determinación de elementos de exclusión	Mapas de potenciales lugares factibles para implementar proyectos ER.
2. Estimación del PHAR de ciudades de Ecuador.	2.1 Análisis de población	Población proyectada a 20 años.
	2.2 Análisis de generación potencial de AR	Generación de AR proyectada a 20 años.
	2.3 Estimación potencial hidrogenético disponible de AR	Mapa de PHAR para aprovechamiento eléctrico de Ecuador (Inventario hidrogenético de AR).
3. Evaluación del impacto significativo de la sinergia AR y energía.	3.1 Evaluación de impacto significativo sinergia AR-energía	Evaluación económica de PER vinculados a la sinergia AR-ER.

Fuente: Elaboración propia.

Datos utilizados

Se utilizaron datos de ciencia de la tierra de la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio (*National Aeronautics and Space Administration: NASA*). Disponibles de forma completa, abierta y sin restricciones. Correspondientes al DEM ALOS PALSAR, con resolución espacial de 12.5 m x 12.5 m (EARTHDATA, 2019). De la capa de cobertura de clasificación de unidades hidrográficas nivel 5 de Ecuador (CUHN5) a nivel Nacional, sistema de referencia WGS84 UTM zone 17S - Proyectado, escala 1:250,000. Obtenida del Sistema Nacional de Información de Ecuador (SIN). Capa que representa los principales afluentes y drenajes menores de las subcuencas hidrográficas de los ríos Carchi, Guayllabamba, Mira, Patate, Chambo, Yaguachi, Upano y Zamora (SENAGUA, 2011). De caudales medios de AR proyectados para las ciudades de Tulcán, Ibarra, Quito, Latacunga, Ambato, Riobamba, Guaranda, Cuenca y Loja. Obtenidos de las empresas públicas de agua potable y alcantarillado de las ciudades, con la consideración de la dotación per cápita de agua de consumo básico (DPACB) (EPMAPA-T, 2019); (EPMAPA-I, 2019); (EPMAPS, 2019); (ETAPA-EP, 2019). Y, de población del VII Censo de Población y VI de Vivienda de 2010, últimos censos realizados. Datos utilizados para la proyección de la población de las ciudades en estudio (INEC, 2010).

Determinación de elementos de exclusión

Los criterios de exclusión de datos utilizados son: datos DEM con baja calidad en resolución espacial, que no posean información del terreno de alta resolución y corregidos por pixel (con mayor cantidad de datos faltantes). Ciudades de Ecuador que en su estructura principal no posean la cordillera de los Andes, oriental u occidental, y que se ubiquen en la región costa, región litoral. Puntos de implementación de potenciales PER que intersectan con infraestructura urbana, que no cumplan con un desnivel de

terreno topográfico mínimo de 60 m, y que no se encuentren en la zona más baja, en términos de elevación, de áreas urbanas ubicadas en la subcuenca hidrográfica.

Métodos de análisis de datos

Modelo digital de elevación DEM: Se desarrolló un código en lenguaje PYTHON, usando el entorno integrado de desarrollo PyCharm 2019.2.1, como instrumento para realizar el análisis del DEM, y así obtener saltos de elevación fuera de los criterios de exclusión (Figura 3).

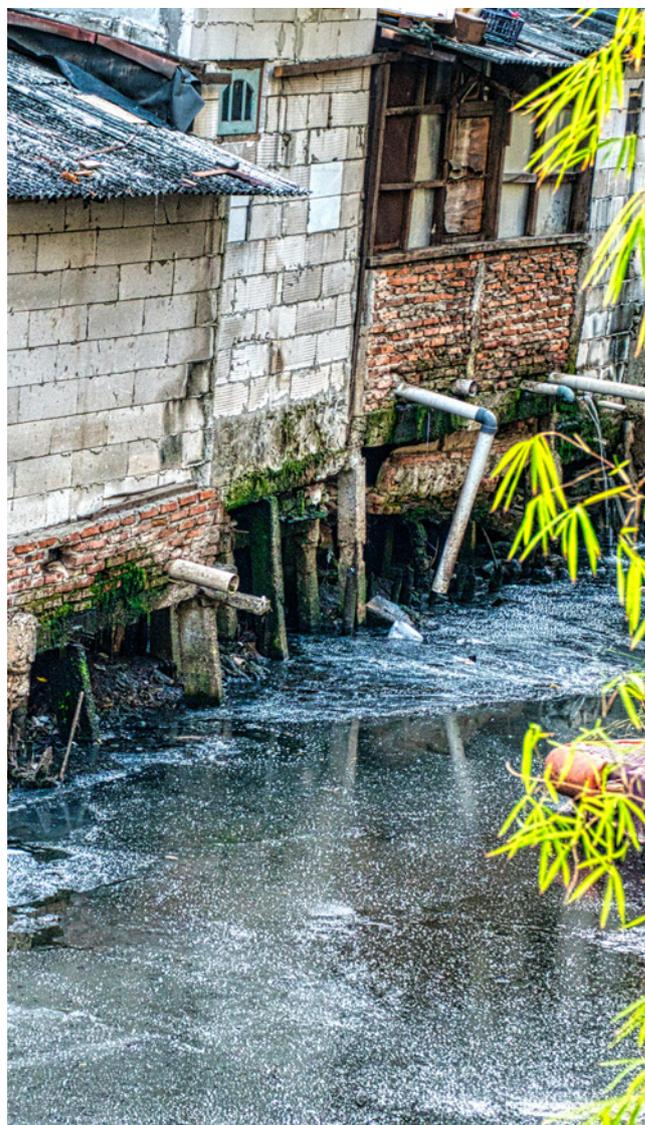
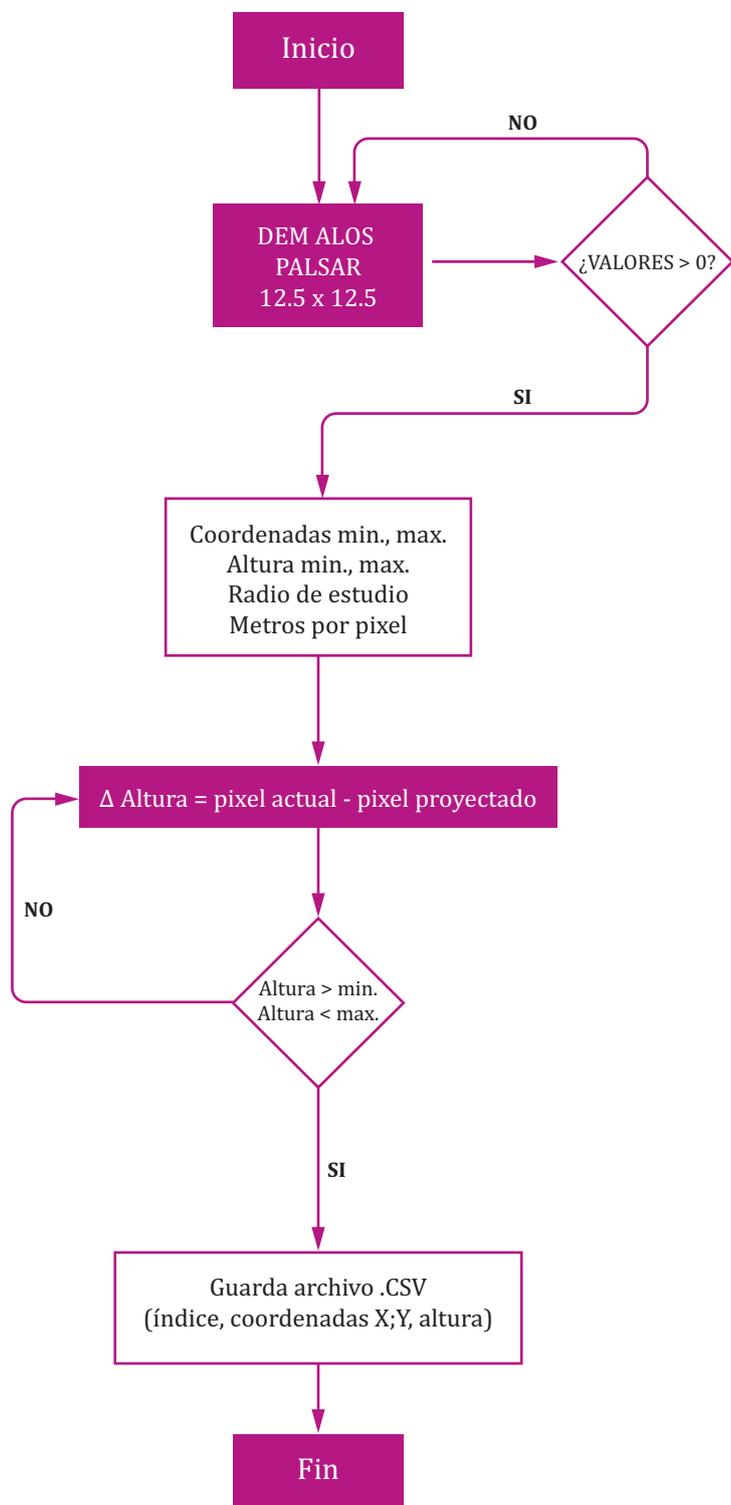


Foto de Tom Fisk en Pexels.



Descripción del código PYTHON

Se ingresa al código los DEM ALOS PALSAR 12.5 x 12.5 descargados para cada ADADM de las subcuencas hidrográficas.

Debido a que los datos de los DEM se encuentran en número de pixel, el código hace un barrido utilizando una ecuación para transformar de pixeles a coordenadas.

Se ingresaron los inputs de:

1. Coordenadas (X_{min} , X_{max} , Y_{min} , Y_{max}) de los DEM.
2. Alturas mínimas y máximas.
3. Radios de estudio.
4. Metros por pixel del DEM.

El código hace un barrido por cada pixel utilizando la operación de diferencias de altura (Δ Altura). La diferencia de altura identificada debe ser mayor a la altura mínima ingresada y menor a la altura máxima ingresada.

Si la condición anterior sucede, el código creará y guardará un archivo con extensión .CSV (archivo delimitado por comas), con la siguiente información:

1. Índice (conteo).
2. Coordenada X del punto.
3. Coordenada Y del punto.
4. Diferencia de altura (Δ Altura).

Figura 3. Diagrama de flujo del código PYTHON

Fuente: Elaboración propia.

Para identificar los lugares factibles de implementar PER se utilizaron en el código los parámetros, *inputs*, de DEM del área de drenaje de los principales afluentes y drenajes menores (ADADM) de cada subcuenca hidrográfica, coordenadas mínimas y máximas de cada DEM, altura hidráulica mínima y máxima ($AH_{min.}$, $AH_{max.}$), radio de estudio y metros por pixel (Mpp)³ (Tabla 3).

Se considera la $AH_{max.}$ constante, 500 m, con base en el estudio previo del proyecto Vindobona⁴ impulsado por la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS), en el cual la $AH_{max.}$ es 520 m (EPMAPS, 2019). Las $AH_{min.}$ y los radios se establecieron con base en varias experiencias. Sí los resultados no se encontraban dentro del ADADM de las subcuencas hidrográficas en estudio, se modifica los *inputs* y se procede a correr de nuevo el código. Para las $AH_{min.}$ se inició con 100 m y se rebaja 20 m. Para los radios se inició con 1,000 m y se rebaja 500 m. Dentro ADADM de la subcuenca hidrográfica del río Patate se ubican las ciudades de Latacunga y Ambato. Para la ciudad de Latacunga la $AH_{min.}$ es 100 m y el radio es 1,000 m. Para la ciudad de Ambato la $AH_{min.}$ es 60 m y el radio es 500 m. También se consideran los Mpp constantes en 12.5 m. Los

parámetros de identificación de PHAR para el ADADM de la subcuenca hidrográfica del río Guayllabamba fueron los establecidos en el proyecto Vindobona.

Como resultados, *outputs*, se obtienen archivos en formato .CSV con la información de coordenadas (X, Y), y altura hidráulica de cada posible lugar para implementar un PER dentro de las coordenadas de cada DEM. Los archivos en formato .CSV se corre con el software libre QGis v3.8.1. Para delimitar los DEM y la representación gráfica de los archivos en formato .CSV con base en el ADADM de las subcuencas hidrográficas, otorgada por la CUHN5, se utilizan la herramienta ráster de extracción “cortar ráster por capa de mascara” y la herramienta vectorial de geoprocso “cortar”.



Foto de Joris Beugels en Unsplash.

3 Con base en la resolución espacial del DEM ALOS PALSAR (EARTHDATA, 2019).

4 El nombre completo del proyecto es “Construcción, operación y mantenimiento de los emisarios interceptores en túnel Tola-Vindobona y San Antonio de Pichincha-Vindobona, centrales hidroeléctricas en los sectores de El Batán y Nayón, planta de tratamiento de aguas residuales y central hidroeléctrica Vindobona”. En el texto se lo mencionará como proyecto Vindobona para simplificar su nombre, que forma parte del Programa de descontaminación de ríos de Quito impulsado por la EPMAPS.

Tabla 3. Parámetros de identificación de PHAR por subcuenca hidrográfica

Subcuenca Hidrográfica	Sistema de referencia de coordenadas (SRC)	Coordenadas DEM				AH mín. (m)	AH máx. (m)	Radio (m)	Mpp (m)
		X mínimo	Y mínimo	X máximo	X máximo				
Carchi	EPSG:32617 WGS84 / UTM zone 17N - Proyectado	847,913.90	66,570.60	927,751.40	138,420.60	60	500	500	12.5
Mira	"EPSG:32717	799,535.00	10,012,013.30	878,535.00	10,083,988.30	80		500	
Patate	WGS84 / UTM zone 17S - Proyectado"	714,406.60	9,847,148.80	797,656.60	9,919,486.30	100.0/60.0		1,000.0/500.0	
Chambo		729,832.40	9,792,039.30	808,344.90	9,864,439.30	100		1,000.00	
Yaguachi		664,732.40	9,791,111.80	749,182.40	9,864,649.30	60		500	
Upano		705,264.70	9,626,902.30	782,214.70	9,699,502.30	100		1,000.00	
Zamora		666,353.30	9,516,882.30	746,365.80	9,588,832.30	60		500	

Fuente: Elaboración propia

Estimación potencial hidroenergético disponible de AR: Se realizó una proyección de la población a un futuro de 20 años, con los datos obtenidos del VII Censo de Población y VI de Vivienda – 2010⁵, que incluye la tasa de crecimiento. Para estimar las poblaciones futuras de habitantes (P) se utilizó la relación entre las poblaciones estimadas en el año 2010 (Po) con las tasas de crecimiento (i) y el número de años a proyectar (n) (Ecuación 1) (SENAGUA, 2016).

$$P = P_o (1 + i)^n \quad (1)$$

Se realizó una proyección del caudal medio de AR que generaría la población. Para estimar los caudales medios de AR proyectados en l/s (Q_m) se utilizó la relación entre las P con las dotaciones per cápita de agua de consumo básico en l/hab.*día (DPACB) (Ecuación 2) (SENAGUA, 2016). La Organización Panamericana de la Salud (OPS) ha determinado la DPACB entre 80 l/hab.*día y un máximo de 100 l/hab.*día (Jaramillo et al., 2010). Se considera que las previsiones que se realizaron en el Plan Nacional de los Recursos Hidráulicos de Ecuador (PNRH) de 1989 resultaron aceptables para el sector agua de consumo básico, pues la DPACB estimada a partir del caudal concedido para servicio doméstico resultó ser de 272 l/hab.*día (CEPAL, 2011).

Se utiliza una DPACB para el caso de las ciudades de Ambato, Cuenca y Loja igual al resultado obtenido por la CEPAL, 272 l/hab.*día, ya que son ciudades consideradas mayores, debido al

5 Siendo estos los últimos censos realizados en el país.

número de sus habitantes (100,000-500,000 habitantes) (CEPAL, 2011). Para la ciudad de Tulcán de 150 l/hab.*día (Almeida, 2019). Para la ciudad de Riobamba de 214.11 l/hab.*día y para la ciudad de Guaranda de 200.72 l/hab.*día (Arellano, Bayas, Meneses, & Castillo, 2018). Para las ciudades de Ibarra y Latacunga el promedio obtenido entre el máximo establecido por la OPS y resultado obtenido por la CEPAL. Es decir, el promedio entre 100 y 272 l/hab.*día, que es igual a 186 l/hab.*día.

$$Q_m = (P * DPACB) / 86400 \quad (2)$$

La cantidad de potencia y energía disponible en AR, está relacionada de manera directa a la altura neta o caída útil, así como a la cantidad de agua, caudal de AR (PNUD, 2013). Para estimar el PHAR en kW se utilizó la relación entre los Q_m en m^3/s con las alturas netas en metros (H), caídas hidráulicas consideradas como la diferencia de altura entre el emisario y la casa de máquinas potenciales a implementar que se obtienen del código PYTHON, y la constante (K) que considera la aceleración de la gravedad (g), 9.8 m/s^2 , la densidad absoluta del agua (ρ), 1000 kg/m^3 , y la eficiencia del grupo generador (η) (Ecuaciones 3 y 4) (Peixoto, 2008); (PNUD, 2013); (Vallejos & Bortoni, 2015); (Bousquet et al., 2017); (Uhunmwangho et al., 2018); (Seme et al., 2018).

$$PHAR = K * Q * H \quad (3)$$

$$K = g * \rho * 10^{-3} * \eta \quad (4)$$

Para generar un diagrama de dispersión que relacione las variables Q_m (m^3/s), H (m) y PHAR (MW) se utilizó el *software* STATGRAPHICS 16.1.15., con la escala de los ejes logarítmica, para un análisis más objetivo de los datos.

Evaluación económica: Para el análisis de la evaluación de impacto significativo de la sinergia AR-ER, se realiza una evaluación económica de los PER vinculados a AR. Como indicador de la viabilidad de la sinergia AR-ER se utilizó el valor actual neto (VAN). Los sitios con VAN positivo se consideraron viables en términos de producción de energía hidroeléctrica con AR y los sitios con VAN negativo se consideraron como no viables (Azqueta et al., 2007). Se identifican los parámetros que intervienen en el flujo de efectivo de las inversiones en los PER, centrales hidroeléctricas con AR (Figura 4). Para estimar los VAN de los PER se utilizó la relación entre los ingresos generados por las instalaciones (R) con los costos anuales de operación ($C_{\text{operation}}$), la tasa de interés (I_d) y los costos de inversión ($C_{\text{investment}}$). Variables de diseño que maximizan los VAN. Los datos obtenidos poseen como unidad monetaria, dólares (\$) (Ecuación 5) (Azqueta et al., 2007); (Bousquet et al., 2017); (Enríquez et al., 2019); (Seme et al., 2018); (Yildiz & Vrugt, 2019).

$$VAN (\$) = \sum_{i=1}^{i=20} \frac{R_{(i)} - C_{\text{operation}(i)}}{(1 + I_d)^i} - C_{\text{investment}} \quad (5)$$

La cantidad de potencia y energía disponible en AR, está relacionada de manera directa a la altura neta o caída útil, así como a la cantidad de agua, caudal de AR.

Tabla 4. Resultados del análisis de proyección demográfica

Característica	Unidad	Ciudades de Ecuador							
		Tulcán	Ibarra	Latacunga	Ambato	Riobamba	Guaranda	Cuenca	Loja
Población VII Censo de Población y VI de Vivienda (2010)	habitantes	60,403.00	139,721.00	98,355.00	178,538.00	156,723.00	55,374.00	331,888.00	180,617.00
Tasa de crecimiento	%	1.2	2	2.2	1	1.6	1.7	1.9	2.7
Población servida proyectada	habitantes	76,375.00	208,434.00	150,804.00	215,703.00	216,557.00	78,035.00	486,443.00	304,746.00

Fuente: Elaboración propia con datos de (INEC, 2010)

Resultados de análisis generación potencial de AR: Los caudales medios de AR proyectados fueron estimados mediante la relación de la población servida proyectada y la DPACB (Tabla 5).

Resultados de potencial hidroenergético de aguas residuales en Ecuador: En la tabla 5, se presentan los resultados de PHAR de las ciudades de la investigación.

Tabla 5. Resultados del análisis de PHAR ciudades andinas de Ecuador

Ciudad	Subcuenca hidrográfica	Población servida proyectada (habitantes)	Dotación per cápita de agua de consumo básico (l/hab.*día)	Posibles puntos PER ⁶	Coordenadas		Altura neta (m)	Caudal medio AR proyectado (m ³ /s)	PHAR (kW)	PHAR (MW)
					X	Y				
Tulcán	Carchi	76,375.0	150.0	1	866,914.90	93,051.70	70	0.13	82.1	0.082
				2	867,914.90	90,419.40	63		73.9	0.074
				3	867,748.20	89,586.90	60		70.4	0.070
Quito	Guayllabamba	2,239,191.0	186.0	1	781,435.00	9,978,305.00	162	7.55	6,000.0	6.000
				2	785,738.00	9,982,860.00	149		6,900.0	6.900
				3	786,385.00	9,999,483.00	520		30,000.0	30.000
Latacunga	Patate	150,804.0	186.0	1	763,778.30	9,889,617.20	105	0.33	301.0	0.301
				2	761,260.80	9,889,323.90	140		401.3	0.401
Ambato	Patate	215,703.0	272.0	1	770,467.70	9,871,022.30	72	0.68	431.2	0.431
				2	769,475.10	9,870,577.00	70		419.2	0.419
				3	768,899.60	9,870,294.60	60		359.3	0.359
Riobamba	Chambo	216,557.0	214.1	1	766,820.00	9,814,205.30	110	0.54	521.0	0.521
Guaranda	Yaguachi	78,035.0	200.7	1	723,645.00	9,815,569.80	62	0.18	99.0	0.099
Total									45,658.4	45.66

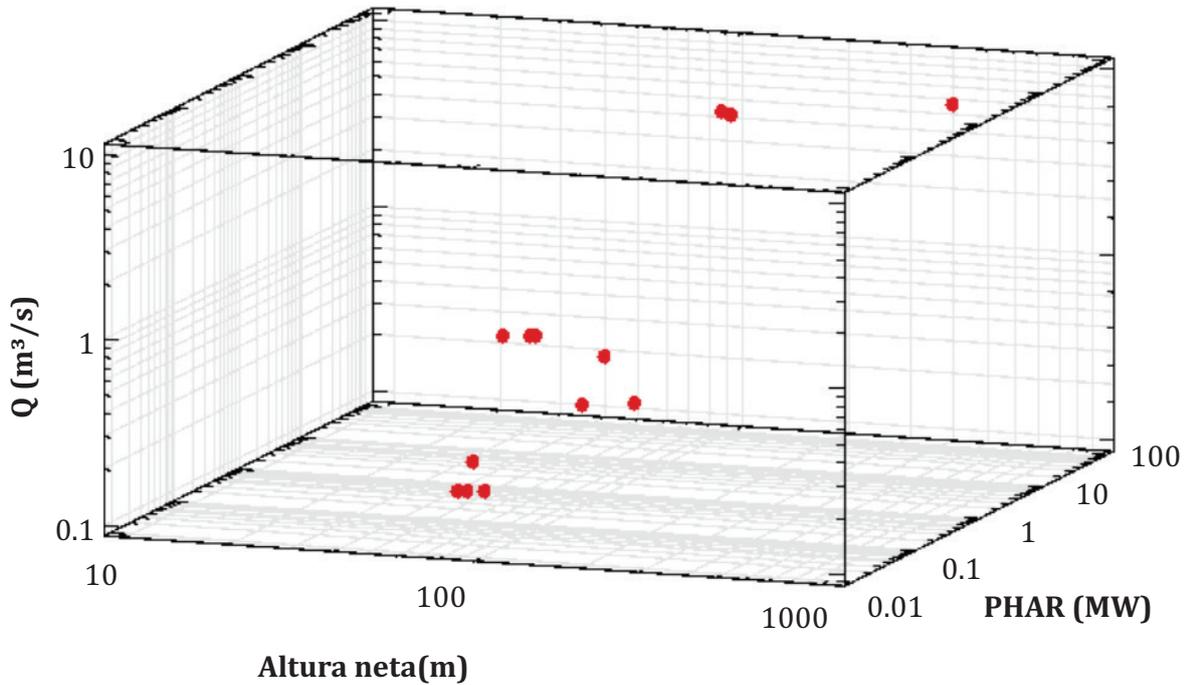
Fuente: Elaboración propia con datos de (EPMAPA-T, 2019); (EPMAPA-I, 2019); (EPMAPS-Q, 2019); (ETAPA-EP, 2019); (Jaramillo et al., 2010); (Arellano et al., 2018); (Almeida, 2019).

6 Proyectos de energías renovables (PER), centrales hidroeléctricas a filo de agua o agua fluyente, sin embalse.

Relación de resultados: Con los datos de las variaciones de caídas hidráulicas potenciales de lugares identificados en las subcuencas hidrográficas, de caudales medios de AR pro-

yectados para las ciudades Andinas y los valores de la estimación de PHAR, se elaboró el diagrama de relación entre Q_m , H y PHAR (Figura 5).

Figura 5. Caudal medio de AR (m³/s) vs. altura (m) vs. potencia (MW)



Fuente: Elaboración propia

Las alturas en estudio oscilan entre 60 y 520 m, con un PHAR máximo de 30 MW y un PHAR mínimo de 0.070 MW. El caudal medio mínimo de AR es 0.133 m³/s y el máximo de 7.55 m³/s. El PHAR posee relación directa proporcional al caudal medio de AR generado, con la consideración del número de habitantes, y a las alturas netas identificadas. Es decir, a mayor número de habitantes, caudal de AR generado y altura neta, mayor PHAR.

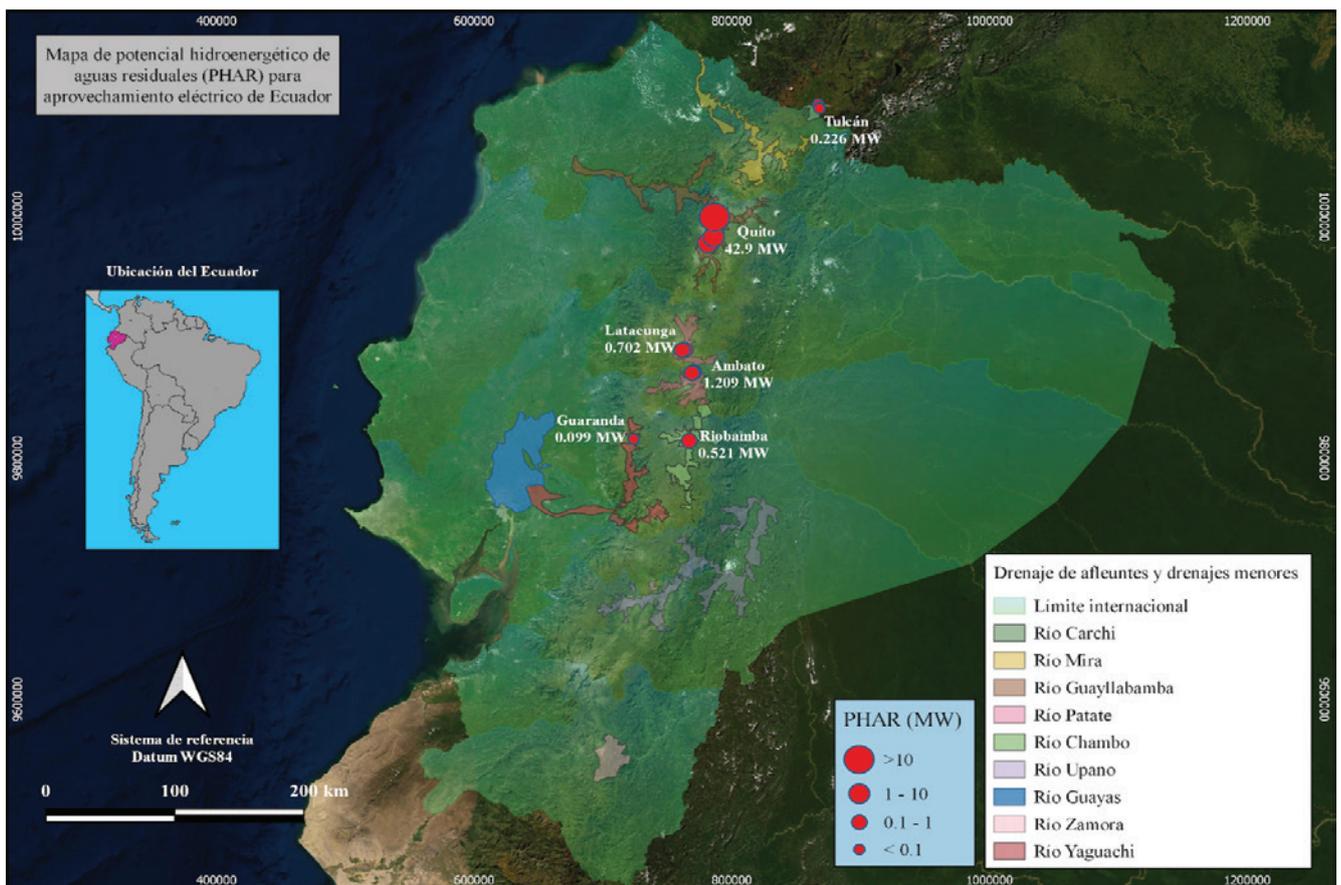
Inventario de potencial hidroenergético de aguas residuales de Ecuador: Mediante la aplicación del método se estima el inventario de PHAR de Ecuador, en el que se identifica las áreas de interés hidroeléctrico mediante AR (Figura 6). Las características de las poblaciones y el consumo de agua potable en ciudades cabeceras cantonales de la región Sierra son

distintas, porque responden a las condiciones de desarrollo socioeconómico de cada una. Por ello, la generación de caudales de AR en cada ciudad es diferente (Arellano et al., 2018). Se verifica que en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), capital de Ecuador, se puede generar un PHAR mayor a 10 MW (30 MW). Se le considera como un PHAR de alto interés hidroenergético para el país. En este lugar, ubicado en el sector de Catequilla-San Antonio de Pichincha, cantón Quito, se implementará una de las tres centrales hidroeléctricas que incluye el proyecto Vindobona. Proyecto de saneamiento ambiental de AR vinculado a la generación de ER, con una potencia a instalarse de 42.9 MW. También se verifica que, en el DMQ se puede generar PHAR entre 1 a 10 MW (6 y 6.9 MW). En la ciudad de Latacunga se verifican dos lugares potenciales para para implementar PER, con unos PHAR entre 0.1 a 1 MW (0.301 y 0.4016 MW). En

la ciudad de Ambato se verifican tres lugares con 0.431, 0.419 y 0.359 MW. En la ciudad de Riobamba se verifica un lugar con 0.521 MW. Además, en las ciudades de Tulcán y Guaranda

se puede generar unos PHAR menores a 0.1 MW. En Tulcán se verifican tres lugares con 0.082, 0.074 y 0.070 MW, y en Guaranda se verifica un lugar con 0.099 MW.

Figura 6. Mapa de potencial hidroenergético de aguas residuales para aprovechamiento eléctrico de Ecuador



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la evaluación económica:
 Para estimar los ingresos (R) de los PER con AR, centrales hidroeléctricas a filo de agua o agua fluente, se consideró la electricidad generada durante un año (MWh/año), que las centrales hidroeléctricas trabajen 5000 h/año y la eficiencia del grupo generador, η , de 90% de rendimiento (Tabla 6).

El PHAR puede ser un instrumento de gestión ambiental para Ecuador, para colaborar en la toma decisiones en implementación de PER y así satisfacer las futuras necesidades energéticas.

Tabla 6. Resultados de ingresos (Dólares, \$)

Ciudad	Subcuenca hidrográfica	Coordenadas		PHAR (MWh/año)	R (\$/año)
		X	Y		
Tulcán	Carchi	866,914.90	93,051.70	410.6	36,951.30
		867,914.90	90,419.40	369.5	33,256.40
		867,748.20	89,586.20	351.9	31,672.80
Latacunga	Patate	763,778.30	9,889,617.20	1,504.90	135,442.40
		761,260.80	9,889,323.90	2,006.60	180,589.50
Ambato	Patate	770,467.70	9,871,022.30	2,156.00	194,036.40
		769,475.10	9,870,577.00	2,096.10	188,646.80
		768,899.60	9,870,294.60	1,796.60	161,697.20
Riobamba	Chambo	766,825.00	9,814,205.30	2,605.00	234,448.70
Guaranda	Yaguachi	723,645.00	9,815,569.80	495	44,540.10

Fuente: Elaboración propia

Los resultados que se obtuvieron de costos del grupo generador ($C_{\text{generatorgroup}}$) y costos adicionales ($C_{\text{additional}}$) se presentan en las tablas 7 y 8.

Tabla 7. Resultados de costos del grupo generador (Dólares, \$)

Ciudad	Subcuenca hidrográfica	Coordenadas			C_{turbine} (\$)			$C_{\text{transformer}}$ (\$)
		X	Y	Pelton	Kaplan	Archimedes screw		
Tulcán	Carchi	866,914.8	93,051.7	202,652.2	398,115.8	333,061.0	13,353.7	
		867,914.9	90,419.4	186,657.3	378,903.5	316,563.3	12,368.4	
		867,748.2	89,586.9	179,699.7	370,323.6	309,203.0	11,946.1	
Latacunga	Patate	763,778.3	9,889,617.2	505,400.1	811,057.3	623,081.3	39,618.0	
		761,260.8	9,889,323.9	574,111.2	928,340.4	715,796.9	51,657.2	
Ambato	Patate	770,467.7	9,871,022.3	599,017.0	1,044,232.9	741,020.1	55,243.0	
		769,475.1	9,870,577.0	589,122.0	1,030,514.0	731,022.6	53,805.8	
		768,899.6	9,870,294.6	545,879.7	958,569.6	678,654.9	46,619.2	
Riobamba	Chambo	766,825.0	9,814,205.3	669,920.1	1,111,132.5	811,801.2	66,019.6	
Guaranda	Yaguachi	723,645.0	9,815,569.8	234,451.4	450,129.4	364,452.1	15,377.4	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Resultados de costos adicionales (Dólares, \$)

Ciudad	Subcuenta hidrográfica	CW1	EHM1	E1	CW2	EHM2	E2	CW3	EHM3	E3
Tulcán	Carchi	17,280.5	10,800.3	8,640.2	32,917.6	20,573.5	16,458.8	27,713.2	17,320.7	13,856.6
		15,922.1	9,951.3	7,961.0	31,301.8	19,563.6	15,650.9	26,314.5	16,446.6	13,157.3
		15,331.7	9,582.3	7,665.8	30,581.6	19,113.5	15,290.8	25,692.0	16,057.5	12,846.0
Latacunga	Patate	43,601.4	27,250.9	21,800.7	68,054.0	42,533.8	34,027.0	53,015.9	33,135.0	26,508.0
		50,061.5	31,288.4	25,030.7	78,399.8	48,999.9	39,199.9	61,396.3	38,372.7	30,698.2
Ambato	Patate	52,340.8	32,713.0	26,170.4	87,958.1	54,973.8	43,979.0	63,701.1	39,813.2	31,850.5
		51,434.2	32,146.4	25,717.1	86,745.6	54,216.0	43,372.8	62,786.3	39,241.4	31,393.1
		47,399.9	29,624.9	23,699.9	80,415.1	50,259.4	40,207.6	58,021.9	36,263.7	29,011.0
Riobamba	Chambo	58,875.2	36,797.0	29,437.6	94,172.2	58,857.6	47,086.1	70,225.7	43,891.0	35,112.8
Guaranda	Yaguachi	19,986.3	12,491.4	9,993.2	37,240.5	23,275.3	18,620.3	30,386.4	18,991.5	15,193.2

Fuente: Elaboración propia

Para estimar el costo de inversión de los PER (Cinvestment), se consideran los resultados estimados de Cgeneratorgroup más los Cadditional (Tabla 9).

Tabla 9. Resultados de costos de inversión de PER (Dólares, \$)

Ciudad	Subcuenta hidrográfica	Cgeneratorgroup ¹	Cgeneratorgroup ²	Cgeneratorgroup ³	Cadditional ¹	Cadditional ²	Cadditional ³	Cinvestment ¹	Cinvestment ²	Cinvestment ³
Tulcán	Carchi	216,005.9	411,469.5	346,414.6	36,721.0	69,949.8	58,890.5	252,726.9	481,419.3	405,305.1
		199,025.6	391,271.8	328,931.7	33,834.4	66,516.2	55,918.4	232,860.0	457,788.1	384,850.1
		191,645.7	382,269.6	321,149.1	32,579.8	64,985.8	54,595.3	224,225.5	447,255.5	375,744.4
Latacunga	Patate	545,018.0	850,675.3	662,699.2	92,653.1	144,614.8	112,658.9	637,671.1	995,290.0	775,358.1
		625,768.4	979,997.6	767,454.1	106,380.6	166,599.6	130,467.2	732,149.1	1,146,597.1	897,921.3
Ambato	Patate	654,260.0	1,099,475.9	796,263.1	111,224.2	186,910.9	135,364.7	765,484.2	1,286,386.8	931,627.8
		642,927.8	1,084,319.8	784,828.4	109,297.7	184,334.4	133,420.8	752,225.5	1,268,654.1	918,249.2
		592,498.9	1,005,188.9	725,274.1	100,724.8	170,882.1	123,296.6	693,223.7	1,176,071.0	848,570.7
Riobamba	Chambo	735,939.7	1,177,152.2	877,820.9	125,109.8	200,115.9	149,229.6	861,049.5	1,377,268.1	1,027,050.4
Guaranda	Yaguachi	249,828.7	465,506.7	379,829.5	42,470.9	79,136.1	64,571.0	292,299.6	544,642.9	444,400.5

Fuente: Elaboración propia

Los costos operativos anuales (Coperation) se establecieron en 4% del Cgeneratorgroup, con base en estudios realizados de costos de inversión de centrales hidroeléctricas (Tabla 10) (IPCC, 2014).

Tabla 10. Resultados costos operativos anuales (Dólares, \$)

Ciudad	Subcuenca hidrográfica	C _{operation 1}	C _{operation 2}	C _{operation 3}
Tulcán	Carchi	8,640.2	16,458.8	13,856.6
		79,61.0	15,650.9	13,157.3
		76,65.8	15,290.8	12,846.0
Latacunga	Patate	21,800.7	34,027.0	26,508.0
		25,030.7	39,199.9	30,698.2
Ambato	Patate	26,170.4	43,979.0	31,850.5
		25,717.1	43,372.8	31,393.1
		23,699.9	40,207.6	29,011.0
Riobamba	Chambo	29,437.6	47,086.1	35,112.8
Guaranda	Yaguachi	9,993.2	18,620.3	15,193.2

Fuente: Elaboración propia

Mediante la aplicación de la ecuación (5), se obtuvieron los siguientes resultados de VAN (Tabla 11).

Tabla 11. Resultados VAN (Dólares, \$)

Ciudad	Subcuenca hidrográfica	VAN 1	VAN 2	VAN 3
Tulcán	Carchi	-29,093.8	-319,546.0	-222,876.7
		-33,048.7	-318,719.9	-255,446.3
		-34,591.1	-317,851.7	-227,028.6
Latacunga	Patate	260,000.1	-194,196.1	85,129.8
		496,631.4	-29,740.9	286,091.4
Ambato	Patate	560,512.9	-101,062.7	349,501.1
		534,778.6	-121,114.8	323,919.1
		396,835.5	-216,407.7	199,536.1
Riobamba	Chambo	758,361.6	102,735.1	547,531.1
Guaranda	Yaguachi	-19,408.4	-339,898.5	-212,585.1

Fuente: Elaboración propia

Es así, que para la ciudad de:

- Tulcán el VAN más alto fue de \$-29,093.8 y el peor fue \$-319,546.0.
- Latacunga el VAN más alto fue de \$496,631.4 y el peor fue \$-194,196.1.
- Ambato el VAN más alto fue de \$560,512.9 y el peor fue \$-121,114.8.
- Riobamba el VAN más alto fue de \$758,361.6 y el peor fue \$102,735.1.
- Guaranda el VAN más alto fue de \$-19,408.4 y el peor fue \$-339,898.5.

Con base en los resultados de PHAR y la clasificación de centrales hidroeléctricas otorgada por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) (PNUD, 2013), se establecieron los tipos de centrales hidroeléctricas recomendadas para ser implementadas como PER rentables en los posibles lugares factibles identificados (Tabla 12).

Tabla 12. Clasificación de centrales hidroeléctricas⁷

Ciudad	Subcuenca hidrográfica	Posibles puntos proyectos ER	Coordenadas		Altura neta (m)	Caudal medio AR proyectado (m ³ /s)	Tecnología Turbina	PHAR (kW)	PHAR (MW)	Tipo de central hidroeléctrica
			X	Y						
Quito	Guayllabamba	1	781,435.0	9,978,305.0	162.0	7.55		6,000.0	6.0	Pequeña central
		2	785,738.0	9,982,860.0	149.0			6,900.0	6.9	Pequeña central
		3	786,385.0	9,999,483.0	520.0			30,000.0	30.0	Mediana central
Latacunga	Patate	1	763,778.3	9,889,617.2	105.0	0.33	Pelton	301.0	0.31	Mini central
		2	761,260.8	9,889,324.0	140.0			401.3	0.40	Mini central
Ambato	Patate	1	770,467.7	9,871,022.3	72.0	0.68		431.2	0.43	Mini central
		2	769,475.1	9,870,577.0	70.0			419.2	0.42	Mini central
		3	768,899.6	9,870,294.6	60.0			359.3	0.36	Mini central
Riobamba	Chambo	1	766,825.0	9,814,205.3	110.0	0.54		521.0	0.52	Mini central

Fuente: Elaboración propia

Con base en el diagrama de relación caudal, altura y potencia del estudio *Small and mini hydropower solutions* (ANDRITZ, 2019) se considera

para los PER con AR la turbina Pelton. La relación que existe entre las variables determina que la tecnología a implementar sea la mencionada.

⁷ Solo se presentan resultados con VAN positivo, es decir PER rentables.

DISCUSIÓN

La especie humana, en toda su evolución, ha buscado la manera de satisfacer sus necesidades mediante las interrelaciones cotidianas con el ambiente. En la actualidad, dichas interrelaciones generan residuos (sólidos o líquidos), que han superado el nivel de resiliencia del ambiente, lo que produce contaminación de agua, aire y suelos (Teca, 2016).

El PHAR depende de las condiciones locales como topografía, población, sistemas de saneamiento de AR. Además, debe verificarse mediante un análisis detallado cada objetivo específico de los sistemas de saneamiento de AR implementados o proyectados, en cada ciudad, región o país (Bousquet et al., 2017).

Se identificaron 13 posibles lugares factibles para implementar PER. Estos lugares poseen la consideración de que, todas las áreas urbanas están conectadas entre sí y que las AR son captadas y conducidas por gravedad a la zona de nivel más bajo en la subcuenca hidrográfica. El PHAR de las ciudades de Ecuador que intervienen en la investigación se estimó en 45.66 MW. Fuera de estos 45.66 MW, 42.9 MW corresponden a la capacidad hidroeléctrica (potencia) por instalar, a partir de AR crudas y tratadas, del proyecto Vindobona. Este PHAR estimado, sin explotar, puede sustituir en un 1.1% a lo que se estima implementar mediante centrales hidroeléctricas con embalses, transformándose en contribución a las futuras necesidades energéticas de Ecuador, mediante ER amigable con el ambiente.

Los mayores valores de PHAR para Ecuador, que incluyen los estimados por el proyecto Vindobona y los estimados por la aplicación de la metodología de la investigación, se ubican en zonas de las ciudades DMQ, Latacunga, Ambato y Riobamba. Los altos PHAR que se pueden generar en el DMQ se explican por el desarrollo urbano, que ha impulsado una mayor

generación de AR en la capital de Ecuador, 7.55 m³/s. Vinculado a su topografía, con considerables alturas netas mayores a 145 m.

Los lugares en la cordillera de los Andes, con altas caídas, destacaron entre las alturas netas con caudales medios de AR bajos. Tres de los PHAR más altos, sin considerar los estimados en el proyecto Vindobona, tienen alturas netas superiores a 100 m (105, 140 y 110 m), con caudales medios de AR inferiores a 0.6 m³/s (0.33 y 0.54 m³/s). El 96.04% del PHAR de Ecuador se extiende en las subcuencas hidrográficas de los ríos Guayllabamba, Patate y Chambo. Un 0.94% fue ubicado en las subcuencas hidrográficas de los ríos Carchí y Patate, con caídas hidráulicas bajas de 60 m. Sin embargo, no se identificó PHAR en las subcuencas hidrográficas de los ríos Mira, Upano y Zamora. Así como tampoco, en la subcuenca hidrográfica del río Guayas, debido a que esta no se encuentra en la cordillera de los Andes y no posee caídas hidráulicas a considerar.

En el caso de la ciudad de Cuenca, enmarcada en la subcuenca hidrográfica del río Upano, existe la PTAR Ucubamba. Esta PTAR trata el 95% de AR de la ciudad (ETAPA EP, 2019). Pero mediante la metodología no se identificó un lugar con caída efectiva, por lo que se debe analizar otro tipo de ER para el caso de estas AR, que no dependan de combustibles fósiles para actividades de bombeo. Es muy importante que la implementación de los proyectos de ER que aprovechan las AR promuevan la investigación y desarrollo en la academia, de esta manera facilitar el acceso a la educación y capacitación en ER dando como resultado estudios de viabilidad y financiamiento (Comité Editorial ENERLAC, 2020).

El valor de los ingresos (R) durante el primer año de operación hasta culminar la vida útil de los PER, período de 20 años para el estudio, varía en función de la generación anual de electricidad de cada uno. El costo de la turbina,

C_{turbine} o C_{tu} , depende de la tecnología adoptada. En la investigación se seleccionó para los PER la turbina Pelton, tecnología utilizada en estudios previos con resultados similares en la elección de la turbina. Caso específico es el proyecto Vindobona, vinculado al saneamiento ambiental de AR con generación de ER del DMQ. Los VAN para los mejores escenarios, de cada ciudad, se estimaron con la consideración de la turbina Pelton y para los peores escenarios son los estimados con la consideración de la turbina Kaplan. Con base en el análisis de flujo de efectivo, los resultados obtenidos de VAN (Tabla 11) fueron un beneficio para los lugares identificados en las ciudades de Latacunga, Ambato y Riobamba. Es decir, se consideraron los PER rentables en términos de producción de energía hidroeléctrica con AR.

Existen lugares identificados con VAN negativo, que se consideran como no rentables en términos de producción de energía hidroeléctrica con AR, al considerar los 3 tipos de tecnologías de turbina. Este es el caso de los posibles PER para las ciudades de Tulcán y Guaranda. El alto costo del grupo generador al considerar la turbina Pelton, entre \$191,646 y \$735,940, dificulta la viabilidad de este tipo de micro centrales hidroeléctricas con AR. Pero, en estas ciudades se consideran PER con costos de inversión bajos, promedio de \$378,627; que pueden ser factibles de implementar integrando las centrales en un mismo PER. Se debe considerar que, en casos particulares, se podría realizar una captación de descargas de AR agregando una o más ciudades/comunidades vecinas. Con la intervención de conexiones de red de captación y conducción (alcantarillo y emisarios). Es decir, el diseño de la definición del polígono urbano a cubrir con el servicio puede ser mancomunado.

Los VAN se estiman con los ingresos que otorga la producción de energía por cada uno de los PER a implementar. Con base en los resultados, en Ecuador, no son rentables proyectos PER con una potencia instalada menor a

300 kW, porque la inversión que se realizaría no podría ser recuperada durante la vida útil de estos PER, a pesar de que se justificaría por el beneficio que aportarían al cuidado del ambiente.

En países avanzados, la discusión sobre ER no es nueva, regulaciones y tarifas ya están establecidas. A diferencia en los países en desarrollo, las leyes y las tarifas relacionadas con ER no se han establecido (Akçay et al., 2017). Para evitar cambios en leyes y tarifas, lo que a su vez resulta en fluctuaciones en el precio de venta de la energía (Akçay et al., 2017), se debería establecer en Ecuador las leyes y las tarifas relacionadas con ER, en específico energía hidroeléctrica con AR. La transición del sistema de saneamiento de AR actual a un sistema que incorpora recuperación de energía y reciclaje de AR puede ofrecer reducción del potencial de CC (Xue et al., 2016).

Se identificó que la característica principal de implementación de las centrales hidroeléctricas a filo de agua o agua fluyente, es que no consideran un embalse, lo que minimiza el impacto ambiental negativo de los PER. Se establece que en mayor parte los PER posibles a implementar en Ecuador son mini centrales hidroeléctricas (6), seguido por pequeñas centrales hidroeléctricas (2), hasta el tipo de mediana central hidroeléctrica (1).

El PHAR puede ser un instrumento de gestión ambiental para Ecuador, porque podría impactar de manera positiva tanto para colaborar en la toma de decisiones en implementación de PER y así satisfacer las futuras necesidades energéticas, como apoyar en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, en específico los ODS: ODS 1. Erradicar la pobreza en todas sus formas en todo el mundo. ODS 3. Garantizar una vida saludable y promover el bienestar para todos y todas en todas las edades. ODS 5. Lograr la igualdad entre los géneros y empoderar a todas las mujeres y niñas. ODS 8. Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el

empleo pleno y productivo, y el trabajo decente para todos. ODS 13. Tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. Además, es beneficioso porque la energía transformada por medio de la implementación de PER vinculados a la gestión ambiental de AR, puede ser utilizada para abastecer a:

- PER (Ej. Mini centrales hidroeléctricas con AR crudas o tratadas).
- Proyectos de saneamiento ambiental de AR, vinculado a la creciente demanda de energía para la gestión de las mismas en las ciudades (Ej. PTAR, que puede ubicarse aguas arriba o aguas abajo de los PER).
- Proyectos de dotación de agua potable en lugares que no llega la cobertura del servicio público (Ej. Obtener agua potable para consumo humano mediante bombeo de aguas subterráneas de un pozo).
- Otros proyectos (Ej. Movilidad metro eléctrico).

Al invertir en PER con aprovechamiento de AR las ciudades de la investigación no dependerían solo de la energía del sistema nacional interconectado, podrían obtenerla de fuente propia con relación en la protección del ambiente. Lo que se traduce en sustentabilidad, así como el estudio demostrado por la Universidad Tecnológica de Tabasco en una PTAR de Tabasco, México que permite determinar el potencial de generación de electricidad a través de fuentes renovables e impulsar y promover el desarrollo e implantación de este tipo de tecnología resultando una reducción del 78% de GEI (López et al., 2020).

Sin embargo, se deben generar datos e información adicionales sobre la generación de AR y la demanda de energía para Ecuador, a través de esfuerzos conjuntos entre funcionarios gubernamentales e investigadores (Yin et al., 2018). Mejorar el nivel de gestión ambiental en

Ecuador sería una forma efectiva de mejorar la eficiencia de la sinergia AR-ER, haciendo énfasis en la innovación del sistema (Wang, Sun, & Wang, 2019).

En la actualidad, el Buen Vivir es una alternativa que incita a un cambio de paradigma, obligando a salir del antropocentrismo para virar hacia una perspectiva sociobiocéntrica, lo cual, en efecto puede mixturarse con el desarrollo de Comunidades Energéticas y elementos que configuren sistemas eléctricos amigables con el ambiente y los diversos espacios y arreglos sociales (Poque, 2020).

Parece que, aunque existe una compensación entre la energía y la seguridad ambiental, los conceptos de seguridad energética se han acercado cada vez más a los conceptos que involucran la sostenibilidad. El aspecto sostenible de la seguridad energética se puede definir como: garantizar la disponibilidad continua de energía, en diversas formas, en las cantidades necesarias y con los costos globales más bajos posibles (Silva et. al, 2020).

CONCLUSIONES

El método propuesto para estimación de PHAR es novedoso, debido a que vincula SIG y aprovechamiento de AR para generación de ER. Otorga información, a escala de país, útil para identificar lugares factibles para implementar posibles PER y estimar la producción anual de hidroelectricidad mediante AR. Este método, con base en elementos de SIG, lugares de la cordillera de los Andes con áreas urbanas grandes y mayor población, caudales medios de generación de AR, costos de inversión y VAN como indicador de rentabilidad, permite realizar una evaluación del impacto significativo de la sinergia AR-energía, mediante la evaluación económica de la viabilidad de cada PER posible a implementar.

Se identificaron 13 posibles lugares factibles para implementar PER, centrales hidroeléctricas

a filo de agua o agua fluyente. Lugares ubicados en las subcuencas de los ríos Carchi, Guayllabamba, Patate, Chambo y Yaguachi. De estos 13 lugares, 10 fueron identificados mediante la aplicación del método establecido en el estudio, los restantes 3 fueron identificados mediante los estudios del proyecto Vindo-bona, proyecto de saneamiento ambiental de AR vinculado a la generación de ER. Sin embargo, de estos 10 lugares identificados solo 6 se consideraron rentables en términos de producción de ER con AR, cada uno con una potencia instalada superior a 300 kW. Teniendo en cuenta la relación entre las variables de ingresos generados, costos anuales de operación, tasa de interés y costos de inversión de las instalaciones de los PER posibles a implementar.

El potencial hidroenergético de aguas residuales (PHAR) de Ecuador estimado, sin explotar, es de 45.66 MW. Este PHAR puede sustituir en un 1.1% a lo que se estima implementar mediante centrales hidroeléctricas con embalses. Es beneficioso porque aportaría a las futuras necesidades energéticas de Ecuador y al cuidado del ambiente, debido a que sería generado mediante el aprovechamiento de AR, que en la actualidad en el país no se realiza, lo que se traduce en un impacto positivo. En específico, colaboraría con la satisfacción de la demanda de energía de proyectos de saneamiento ambiental de AR, PTAR's, vinculados a generación de ER con la consideración de que, en casos particulares, se podría realizar una captación y conducción de descargas de AR agregando una o más ciudades/comunidades vecinas. A pesar de no ser un potencial alto, se considera importante por la integración de economía circular al proceso de generación de electricidad.

El método establecido permite una estimación del PHAR en cualquier área de estudio dada. Los resultados varían de manera importante en función de las consideraciones realizadas para cada uno de los componentes del $C_{investment}$. Por lo descrito, el método debe enfocarse como

un instrumento de gestión ambiental, para el apoyo en la toma de decisiones y colaborar en el cumplimiento de los ODS. El método otorga conceptos generales, por lo que se debe considerar la realización de estudios específicos en cada lugar en particular, con la inclusión de más variables para que los resultados sean más cercanos a la realidad. En comparación con otros métodos utilizados para estimar un potencial hidroenergético, tiene como ventajas la practicidad y agilidad en la obtención de resultados. Por lo que puede representar un instrumento de gestión ambiental clave y útil en la determinación de un inventario hidroenergético de aguas residuales de Ecuador.

Los beneficios de implementar PER con AR, Wastewater to energy, son el aporte de 13.79 GWh/año de ER, la disminución de alrededor de 139,610 toneladas anuales de CO₂ emitidas como GEI⁸, al reducir el uso de combustibles fósiles contaminantes para la generación de electricidad, la generación de empleos verdes en las fases de construcción y operación, y el cambio de paradigma en la visión de las AR consideradas como desechos líquidos, reincorporándolas a un nuevo proceso de generación de energía limpia.

Existe sinergia entre AR y ER. Los caudales medios de AR descargados a la red de alcantarillado público pueden ser interceptados y conducidos hacia una PTAR. En su camino y en la descarga se puede aprovechar el desnivel topografía del territorio como potencial hidráulico para la generación de energía limpia y como un método de pretratamiento al oxigenar las AR. ■

8 Para estimar las emisiones de GEI evitadas, se utiliza el factor de emisión de CO₂ nacional para Ecuador, con referencia a termoelectricas operando, otorgado por el Ministerio del Ambiente de Ecuador cuyo valor es 0.5062 TonCO₂/MWh. Este factor es la masa estimada de toneladas de CO₂ emitidas a la atmósfera por cada unidad de MWh de energía eléctrica generada (MAE, 2013).

Agradecimientos

Agradecemos a nuestras familias por el apoyo incondicional, a las instituciones que facilitaron el desarrollo de la investigación, Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Pontificia Universidad Javeriana - Sede Bogotá y Departamento de Desarrollo Tecnológico en Inteligencia Artificial e Innovación, PROEX-PONENTE S.A. Un especial agradecimiento a Efraín Antonio Domínguez Calle, investigador destacado, mentor y facilitador, en su memoria.

REFERENCIAS

- Akçay, E. C., Dikmen, I., Birgonul, M. T., & Ardi, D. (2017). Estimating the profitability of hydropower investments with a case study from Turkey. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(8), 1002–1012. <https://doi.org/10.3846/13923730.2017.1350877>
- Almeida, C. (2019). Propuesta de optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales “Vivienda Popular” de la ciudad de Tulcán, provincia del Carchi. *Duke Law Journal*, 1(1), 1–13. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- ANDRITZ. (2019). *Small and mini hydropower solutions*. Retrieved from www.andritz.com
- Arellano, A., Bayas, A., Meneses, A., & Castillo, T. (2018). Drinking water consumption and endowment in Ecuadorian populations lower than 150,000 people. *NovaSinergia*, (1), 23–32.
- ArcGIS Pro. (2019). *Modelo de elevación digital (DEM)*. Recuperado de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/exploring-digital-elevation-models.htm>
- Asamblea Nacional de la República del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Recuperado de https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf
- Azqueta, D., Alviar, M., Domínguez, L., y O’Ryan, R. (2007). *Introducción a la Economía Ambiental*. Madrid, España; Bogotá McGraw-Hill Interamericana Editores c2007. xxvi.
- Bousquet, C., Samora, I., Manso, P., Rossi, L., Heller, P., & Schleiss, A. J. (2017). Assessment of hydropower potential in wastewater systems and application to Switzerland. *Renewable Energy*, 113, 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.062>
- CEPAL. (2011). *Diagnóstico de la Estadística del Agua en Ecuador*. 81. Retrieved from [http://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/archivos/download/Diagnostico de las Estadísticas del Agua Producto IIIc 2012-2.pdf](http://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/archivos/download/Diagnostico%20de%20las%20Estadisticas%20del%20Agua%20Producto%20IIIc%202012-2.pdf)
- Comité Editorial ENERLAC. (2020). Mejora, aumento y facilitación del acceso a la educación y capacitación en energía renovable en América Latina. ENERLAC. *Revista de energía de Latinoamérica y el Caribe*, 4(1), 6–9. <http://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/150>
- Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC). (2013). Estudio y Gestión de la Demanda Eléctrica. *Plan Maestro de Electrificación 2013-2022*, 2, 206.
- Connor, R., Coates, D., Uhlenbrook, S., & Koncagül, E. (2018). Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua. In *ONU-Agua*.
- Da Rocha, G. O., Dos Anjos, J. P., & De Andrade, J. B. (2015). Energy trends and the water-energy binomium for Brazil. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 87(2), 569–594. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520140560>
- EC-T1386: Apoyo a la Estructuración del Programa de Descontaminación de los Ríos de Quito Recuperado de <https://www.iadb.org/es/projects-search?query%5Bcountry%5D=&query%5Bsector%5D=&query%5Bstatus%5D=&query%5Bquery%5D=EPMAPS&page=5>
- Enríquez, L. A., García, L. J., Miranda, C., & Jordán, A. R. (2019). Influence of structure of wind farms on cost and profit. *Información Tecnológica*, 30(5), 37–46. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500037>

- Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS). (2014). *Historia del Agua en Quito*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/251329256/Libro-Del-Agua>
- Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS). (2019). *Programa para la descontaminación de los ríos de Quito - Bienvenido a EPMAPS. 2*. Retrieved from <https://www.aguaquito.gob.ec/programa-para-la-descontaminacion-de-los-rios-de-quito/>
- Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Guayaquil (EMAPAG EP) (2018). "Los merinos" planta de tratamiento de aguas residuales y sus componentes complementarios. Recuperado de <https://www.emapag-ep.gob.ec/emapag/wp-content/uploads/2018/06/Descripción-del-Proyecto-Merinos.pdf>
- Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Tulcán (EPMAPA-T). (2019).
- Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ibarra (EPMAPA-I). (2019). Recuperado de <https://emapaibarra.gob.ec/>
- ETAPA EP. (2019). *Planta de tratamiento de agua residuales PTAR de Ucubamba*. Recuperado de <https://www.etapa.net.ec/Principal/Agua-potable/Planes-maestros/Factibilidad-Técnica>
- Fan, J. L., Kong, L. S., Wang, H., & Zhang, X. (2019). A water-energy nexus review from the perspective of urban metabolism. *Ecological Modelling*, 392(May 2018), 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.11.019>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). (2010). Recuperado de <http://redatam.inec.gob.ec/cgi-bin/RpWebEngine.exe/PortalAction>
- Jackson, A. L. R. (2011). Renewable energy vs. biodiversity: Policy conflicts and the future of nature conservation. *Global Environmental Change*, 21(4), 1195–1208. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.07.001>
- Jaramillo, M., González, G., & Saldarriaga, O. (2010). Estimación de la demanda de agua. Capítulo 5. *Ideam, Capítulo 5*. Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP5.pdf>
- Kılıç, Ş., Krajačić, G., Duić, N., Rosen, M. A., & Al-Nimr, M. A. (2018). Advancements in sustainable development of energy, water and environment systems. *Energy Conversion and Management*, 176(September), 164–183. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.015>
- López, T., Pérez, O. & Cazán, L. (2020). Generación de energía en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). ENERLAC. *Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe*, 4(1), 12–30. <http://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/128>
- Ministerio del Ambiente de Ecuador (MAE). (2013). *Factor de emisión de CO₂ del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador*. Informe 2013.
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER). (2016). *Plan Maestro de Electricidad 2016-2025*. Recuperado de <https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/index.php/plan-maestro-de-electricidad-2016-2025>.
- Nieves, J. C., Garcia-Gasulla, D., Aulinas, M., & Cortés, U. (2012). An operational approach for implementing normative agents in Urban Wastewater Systems. *Computacion y Sistemas*, 16(1), 27–42. <https://doi.org/10.13053/cys-16-1-1370>
- Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC. (2014). *Informe de Síntesis sobre el Cambio Climático*. Recuperado de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- Pase, H., Da Rocha, H., Dos Santos, E., & Patella, A. (2016). The sociopolitical conflict in hydroelectric enterprises. *Ambiente e Sociedade*, 19(2), 45–66. <https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC135480V1922016>
- Peixoto, A. (2008). *Novas Tendências Nos Estudos De Potenciais Hidrelétricos : Metodologia De Prospecção E*.
- Poque, A. (2020). Transición de los Sistemas de Energía Eléctrica en América Latina y el Caribe (2007-2017): Diagnóstico y Alternativas Sistémicas. *ENERLAC*. 4(1), 78–95. <http://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/116/146>

- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2013). Medición del potencial hidrológico para generación de energía renovable, la experiencia de la Fundación Solar en Guatemala. *Series Técnicas Energías Renovables*, 48. Retrieved from <https://www.undp.org/content/dam/guatemala/05 Potencial Hidrologico paginas.pdf>
- Schreurs, E., Koop, S., & van Leeuwen, K. (2018). Application of the City Blueprint Approach to assess the challenges of water management and governance in Quito (Ecuador). *Environment, Development and Sustainability*, 20(2), 509–525. <https://doi.org/10.1007/s10668-017-9916-x>
- Seme, S., Sredenšek, K., Praunseis, Z., Štumberger, B., & Hadžiselimović, M. (2018). Optimal price of electricity of solar power plants and small hydro power plants – Technical and economical part of investments. *Energy*, 157(2018), 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.121>
- SENAGUA. (2011). *Unidades Hidrográficas Nivel 5*.
- SENAGUA. (2016). Norma de diseño para sistemas de abastecimiento de agua potable, disposición de excretas y residuos líquidos en el área rural. *Secretaría Del Agua*, 1–44. <https://doi.org/10.7>
- Silva, V., Relva, S., Udaeta, M., Gimenes, A. Peyerl, D. (2020). Desafíos e incertidumbres del desarrollo sostenible en la planificación de la energía eléctrica. Un enfoque brasileño. *ENERLAC*, 4(1), 50 – 75. ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)
- Teca, D. (2016). *Tratamiento Primario de Lixiviados: Selección de Aditivos*. Saarbrücken, Deutschland: Omniscriptum GmbH & Co. KG - Editorial Académica Española.
- Teräväinen, T. (2019). Negotiating water and technology-Competing expectations and confronting knowledges in the case of the Coca Codo Sinclair in Ecuador. *Water (Switzerland)*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/w11030411>
- Turconi, R., Boldrin, A., & Astrup, T. (2013). Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 555–565. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.013>
- Uhunmwangho, R., Odje, M., & Okedu, K. E. (2018). Comparative analysis of mini hydro turbines for Bumaji Stream, Boki, Cross River State, Nigeria. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 27(October 2016), 102–108. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.04.003>
- UNESCO WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. París.
- Vallejo, I., Zamora, G., & Sacher, W. (2019). Presentación del dossier. Despojo(s), segregación social del espacio y territorios de resistencia en América Latina. *Íconos - Revista de Ciencias Sociales*, (64), 11–32. <https://doi.org/10.17141/iconos.64.2019.3695>
- Vallejos, J., & Bortoni, E. (2015). Determinación del potencial hidroenergético utilizando herramientas SIG: Cuenca del Río Ypané. *Revista Científica de La UCSA*, 2(1), 75–84.
- Wang, M., Sun, C., & Wang, X. (2019). Analysis of the Water-Energy coupling efficiency in China: Based on the three-stage SBM-DEA model with undesirable outputs. *Water (Switzerland)*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/w11040632>
- Xue, X., Hawkins, T. R., Schoen, M. E., Garland, J., & Ashbolt, N. J. (2016). Comparing the life cycle energy consumption, globalwarming and eutrophication potentials of several water and waste service options. *Water (Switzerland)*, 8(4), 1–21. <https://doi.org/10.3390/w8040154>
- Yildiz, V., & Vrugt, J. A. (2019). A toolbox for the optimal design of run-of-river hydropower plants. *Environmental Modelling and Software*, 111, 134–152. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.018>
- Yin, Z., Jia, B., Wu, S., Dai, J., & Tang, D. (2018). Comprehensive forecast of urban water-energy demand based on a neural network model. *Water (Switzerland)*, 10(4), 1–16. <https://doi.org/10.3390/w10040385>
- Zarfl, C., Lumsdon, A. E., Berlekamp, J., Tydecks, L., & Tockner, K. (2014). A global boom in hydropower dam construction. *Aquatic Sciences*, 77(1), 161–170. <https://doi.org/10.1007/s00027-014-0377-0>