



Levantamiento del potencial de almacenamiento energético con bombeo de agua en República Dominicana

Informe Final – Definición del potencial de almacenamiento energético con bombeo de agua considerando la infraestructura existente y utilizando una metodología aplicada en Sistemas de Información Geográfica.

Como empresa federal, la GIZ asiste al Gobierno de la República Federal de Alemania en su labor para alcanzar sus objetivos en el ámbito de la cooperación internacional para el desarrollo sostenible.

Publicado por:

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Domicilios de la Sociedad

Bonn y Eschborn, Alemania

Friedrich-Ebert-Allee 32 + 36
53113 Bonn, Alemania
T +49 228 44 60-0
F +49 228 44 60-17 66

Dag-Hammarskjöld-Weg 1 - 5
65760 Eschborn, Alemania
T +49 61 96 79-0
F +49 61 96 79-11 15

E info@giz.de

I www.giz.de

Denominación del proyecto

Proyecto Transición Energética (PTE)

Fomento de Energías Renovables para implementar los Objetivos Climáticos en la República Dominicana

Apdo. Postal 2960

Calle Juan García Bonelly No. 19, Edificio Corporativo DML

Local 2A, Ens. Julieta

10130 Santo Domingo

República Dominicana

T +1809 541-1430

I www.transicionenergetica.do

Responsable

Clemens Findeisen, Director Proyecto Transición Energética, GIZ

Autores

DICTUC S.A.

Ejecutado por

Ministerio de Energía y Minas, Empresa de Generación Hidroeléctrica Dominicana, Proyecto Transición Energética, Cooperación Alemana al Desarrollo (GIZ) fomentado por el Ministerio Federal de Economía y Protección del Clima y la Iniciativa Climática Internacional (IKI)

Diseño/diagramación

DIAMOND media GmbH, Neunkirchen-Seelscheid, Alemania

Fotografías/fuentes:

©EGEHID, shutterstock

Material cartográfico

Las representaciones cartográficas tienen carácter netamente informativo y no han sido validadas por fuentes del derecho internacional público en lo que respecta a la determinación de fronteras y territorios. La GIZ no garantiza la actualidad, exactitud o integridad del material cartográfico puesto a disposición. No se asume responsabilidad alguna por cualquier perjuicio surgido directa o indirectamente de su uso.

Por encargo de:

Ministerio Federal de Economía y Protección del Clima

Stresemannstraße 34 - 37


10115 Berlin

T +49 (0)30 18 305-0

F +49 (0)30 18 305-4375

Santo Domingo, 2023

Levantamiento del potencial de almacenamiento energético con bombeo de agua en República Dominicana



Informe Final – Definición del potencial de almacenamiento energético con bombeo de agua considerando la infraestructura existente y utilizando una metodología aplicada en Sistemas de Información Geográfica.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	12
2. METODOLOGÍA PARA IDENTIFICAR EL POTENCIAL DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO CON BOMBEO DE AGUA DULCE	14
2.1 Consideraciones generales	14
2.2 Etapas metodológicas	14
2.3 Criterios y método	16
2.3.1 Esquema metodológico	17
2.3.2 Cálculo y valoración de criterios eléctricos y mecánicos	28
3. IMPLEMENTACIÓN Y APLICACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE GEOPROCESOS Y CONSTRUCCIÓN DE BASE DE DATOS	30
3.1 Escenarios de estudio	30
3.2 Levantamiento de información para la construcción de base de datos	31
3.3 Aplicación de criterios y limpieza de datos previo a la construcción de la base de datos definitiva	33
3.4 Parámetros SIG aplicados a bases de datos	34
3.5 Discriminación de variables presentes en las bases de datos según los escenarios planteados	35
4. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA: ESTIMACIÓN DE POTENCIAL DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO, CAPACIDAD DE GENERACIÓN Y UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS EMBALSES.	36
4.1 Resultados de sitios	36
4.2 Ponderaciones de puntajes de análisis multicriterio	37
4.2.1 Ponderaciones de puntajes	37
4.2.2 Normalización de puntajes ponderados	39
4.3 Aplicación de metodología de costeo	40
4.4 Análisis de mejores sitios encontrados	40
4.4.1 Reservorios nuevos	41
4.4.2 Sitios asociados a centrales existentes	45
5. RESERVORIOS POTENCIALES CATASTRADOS PREVIAMENTE	48
5.1 Proyecto de acumulación por bombeo Camú	50
5.2 Proyecto de hidrobombeo Sabana Yegua	51
5.3 Proyecto de acumulación por bombeo Nigua	52
5.4 Proyecto de hidrobombeo Cajulito	54
5.5 Proyecto de hidrobombeo Los Mesas	56

6. COMENTARIOS FINALES Y RECOMENDACIONES PARA PRÓXIMOS PASOS	58
6.1 Respecto a los reservorios encontrados	58
6.2 Áreas principales donde se ubican los reservorios	60
6.3 Recomendaciones de futuros trabajos	60
6.3.1 Impactos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos en embalses de almacenamiento para centrales de hidrobombeo.	60
6.3.2 Identificación y estudio de habilitación de reservorios potenciales menores para la construcción de presas de almacenamiento para centrales de hidrobombeo.	61
6.3.3 Evaluación técnico-económica de reservorios de almacenamiento para centrales de hidrobombeo.	61
6.3.4 Optimización de embalses sobre o bajo relieve para la habilitación de reservorios de almacenamiento.	61
6.3.5 Verificación en terreno de las condiciones geográficas analizadas e ingeniería de detalle	62
7. REFERENCIAS	63
8. ANEXOS	65
8.1 Centrales Existentes Identificadas	65
8.2 Centrales Nuevas Identificadas	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Levantamiento de reservorios base en una etapa inicial.	9
Figura 2. Reservorios base para la construcción de la base de datos (3,848 polígonos).	10
Figura 3. Reservorio nuevo en la Provincia San Juan (ID 1613-548).	11
Figura 4. Esquema metodológico y etapas.	17
Figura 5. Imagen DEM extraída para República Dominicana.	18
Figura 6. Esquema de geoproceso automatizado aplicado en software SIG (izquierda); Esquema de levantamiento de reservorio (derecha).	19
Figura 7. Levantamiento de reservorios base en una etapa inicial.	20
Figura 8. Aplicación de filtro "áreas de protección y restricción" (en rojo).	21
Figura 9. Reservorios base para la construcción de la base de datos (3,848 polígonos).	22
Figura 10. Detalle de capa de cotas de elevación, cercano a Loma en Gajo Medio.	23
Figura 11. Función de puntaje para ponderación de criterio de superficie.	38
Figura 12. Imagen de ubicación referencial del proyecto Camú (en rojo áreas de protección y/o restricción)	50
Figura 13. Imagen de ubicación referencial del proyecto Sabana Yegua (en rojo áreas de protección y/o restricción)	51
Figura 14. Imagen de ubicación referencial del proyecto Nigua (en rojo áreas de protección y/o restricción)	52
Figura 15. Imagen de ubicación referencial del proyecto Cajulito (en rojo áreas de protección y/o restricción)	54
Figura 16. Imagen de ubicación referencial del proyecto Los Mesas (en rojo áreas de protección y/o restricción)	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cuadro de articulación metodológica	15
Tabla 2. Fuente de suministro e información	16
Tabla 3. Características de equipamiento electromecánico.	25
Tabla 4. Definición de criterios y valores incluidos en las diferentes etapas de medición.	26
Tabla 5. Niveles de relevancia de los reservorios.	28
Tabla 6. Descripción de las capas utilizadas para la extracción de datos	32
Tabla 7. Ponderadores reservorios nuevos.	37
Tabla 8. Ponderadores centrales existentes.	38
Tabla 9. Clasificación de los resultados normalizados para reservorios nuevos	39
Tabla 10. Clasificación de los resultados normalizados para centrales existentesnuevos	39
Tabla 11. Principales proyectos de hidrobombeo	49
Tabla 12. Características de presas existentes conectadas al reservorio ID 7714	53
Tabla 13. Características de presas existentes conectadas al reservorio ID 4052	55
Tabla 14. Características de presas existentes conectadas al reservorio ID 2244	57

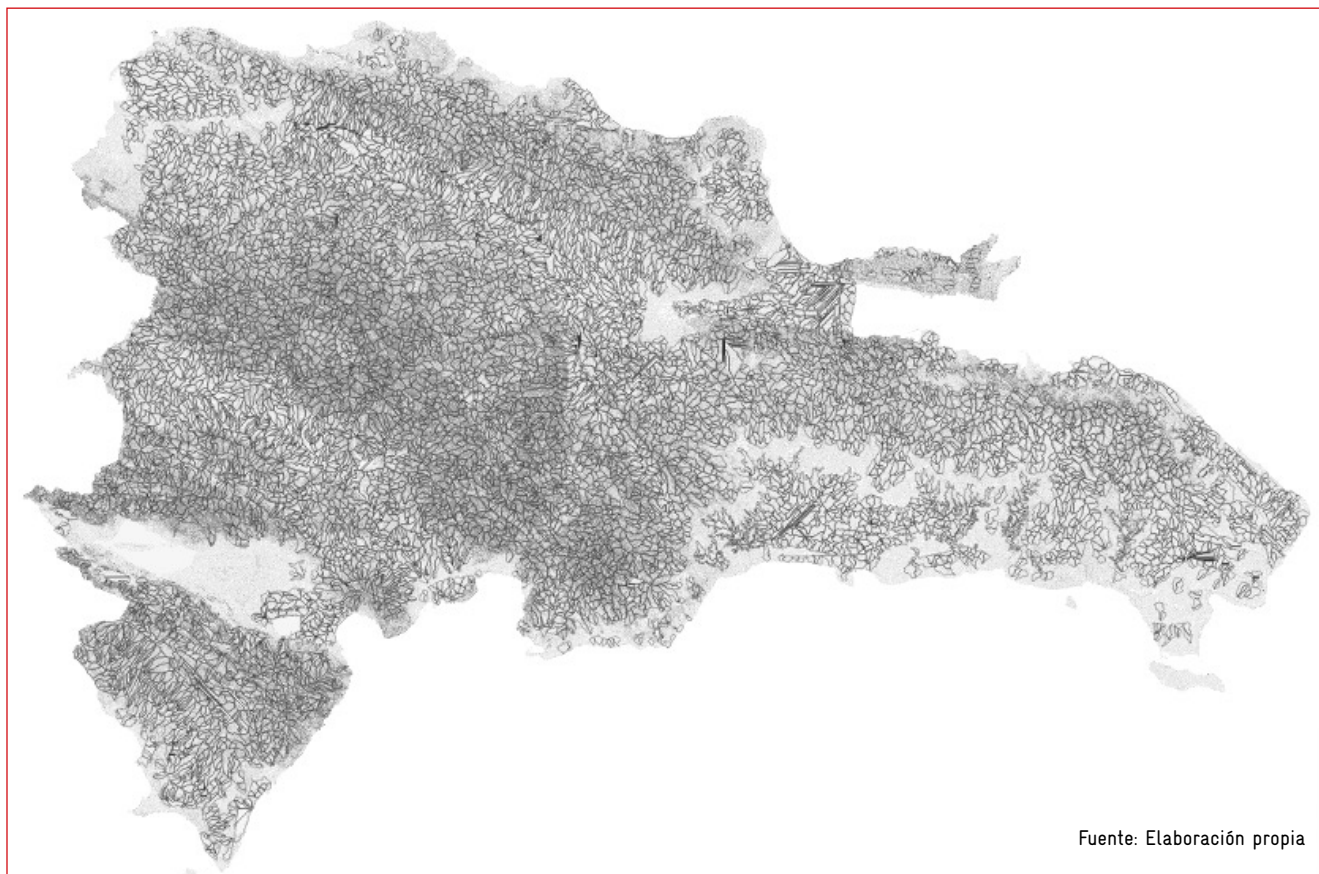
LISTA DE ABREVIATURAS

CA	Corriente Alterna
CC	Corriente Continua
CCS	Combined Charging System (Sistema de carga combinada)
CLP	Comunicación mediante Línea de Potencia
CO ₂	Dióxido de carbono
ECVE	Estación de Carga para Vehículos Eléctricos
EDE	Empresa Distribuidora de Electricidad
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz (Ley de la industria energética de Alemania)
ER	Energía Renovable
EUR	Euro
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (Sociedad Alemana de Cooperación Internacional)
GNC	Gas Natural Comprimido
H/W	Hardware
ID	Interruptor Diferencial
IEC	International Electrotechnical Commission (Comisión Electrotécnica Internacional)
ISO	International Organization for Standardization (Organización Internacional para la Estandarización)
kW	Kilovatio
kWh	kilovatio hora
NID	Nivel de Inundación de Diseño
OCHP	Open Clearing House Protocol (Protocolo de centro de intercambio abierto)
OCPI	Open Charge Point Interface (Interfaz de puntos de carga abierta)
OCPP	Open Charge Point Protocol (Protocolo de punto de carga abierto)
Ofgem	Office of Gas and Electricity Markets (Oficina de Mercados de Gas y Electricidad)
OPC	Operador del Punto de Carga
OpenADR	Open Automated Demand Response (Respuesta a la demanda automatizada abierta)
OppCharge	Opportunity Charge (Carga de oportunidad)
OSCP	Open Smart Charging Protocol (Protocolo de carga inteligente abierto)
PMR	Precio Máximo de Reventa
PSE	Proveedor de Servicios de Electromovilidad
PSN	Proveedor de Servicios en la Nube
S/W	Software
SGE	Sistema de Gestión de Energía (Energy Management System).
SIE	Superintendencia de Electricidad
SOC	State of Charge (Estado de carga de la batería)
TCAC	Tasa de Crecimiento Anual Compuesto
THD	Total Harmonic Distortion (Distorsión armónica total)
V2G	Vehicle to Grid (Vehículo-a-red)
V2H	Vehicle to Home (Vehículo-a-casa)
VE	Vehículo Eléctrico
VEB	Vehículo Eléctrico de Batería
VHEE	Vehículo Híbrido Eléctrico Enchufable

RESUMEN EJECUTIVO

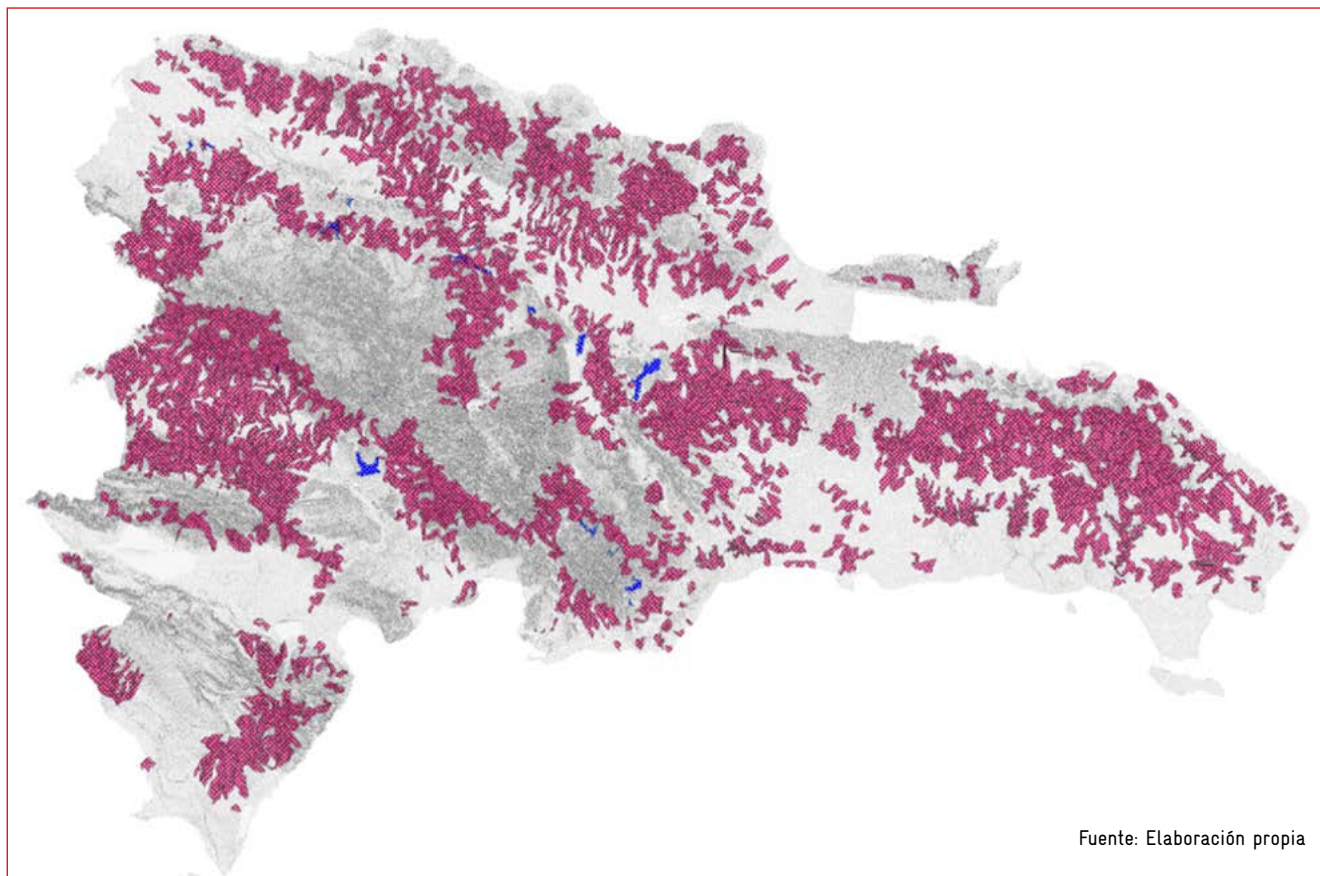
Las hidroeléctricas de almacenamiento con bombeo o centrales de hidrobombeo son una de las alternativas tecnológicas que pueden proveer al sistema eléctrico estabilidad, capacidad de almacenamiento y servicios auxiliares como control de frecuencia y reserva estratégica. Esto es de gran importancia en sistemas eléctricos con alta penetración de energía renovable puesto que requieren aumentar la flexibilidad. Por otro lado, esta alternativa puede proporcionar almacenamiento a mediano plazo de manera rentable aprovechando las infraestructuras de las centrales hidroeléctricas ya existentes en lugar de proyectos completamente nuevos, lo que brinda oportunidades para acelerar las capacidades de almacenamiento localmente. República Dominicana cuenta con más de 600 MW de capacidad hidroeléctrica instalada que se puede aprovechar de cara al incremento sustancial de la participación de las energías renovables variables en la matriz de generación eléctrica.

En el marco del Proyecto Transición Energética, bajo el componente de Integración de Energías Renovables Variables y Planificación Energética, la GIZ, el Ministerio de Energía y Minas (MEMRD) y la Empresa de Generación Hidroeléctrica Dominicana (EGEHID) presentan el estudio “Levantamiento del Potencial de Almacenamiento Energético con Bombeo de Agua Dulce en República Dominicana”. Este tuvo como objetivo hacer un levantamiento del potencial de almacenamiento energético con bombeo de agua dulce en toda la geografía de República Dominicana, utilizando una metodología aplicada en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Dicha metodología consideró las distintas configuraciones de acuerdo con los embalses existentes según era el caso (por ejemplo, dos existentes, sólo uno existente y un terreno detectado para construcción o dos terrenos detectados para construcción) y la identificación de nuevas áreas y potenciales. También se incluyeron consideraciones técnicas, ambientales y sociales asociadas a la construcción de este tipo de centrales en un terreno determinado.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1. Levantamiento de reservorios base en una etapa inicial.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Reservorios base para la construcción de la base de datos (3,848 polígonos).

Como resultado, en una primera etapa, se definieron 10,542 polígonos como reservorios base, cuya principal característica es actuar como una microcuenca, conectada a la red hídrica. Tras la aplicación de una serie de filtros iniciales, se construyó una base de datos de 1,261 polígonos para los reservorios existentes y 3,848 polígonos para los reservorios nuevos.

Para el caso de los reservorios existentes, se analizaron 15 áreas que actualmente ya funcionan conectadas a una presa, las áreas principales son San Juan (con las áreas de mayor ponderación), Las Matas de Farfán y Constanza. El análisis de este escenario resultó ser más restrictivo, fundamentalmente por las cotas de operación de las presas en relación con los potenciales reservorios y la proximidad entre ambas áreas. El principal desafío

es la adaptación técnica de las presas existentes con reservorios potenciales, más aún, cuando existen áreas residenciales no consolidadas alrededor de estos reservorios o, por otro lado, las condiciones geográficas naturales del país.

En el caso de los reservorios nuevos, al explorar de manera hipotética las áreas de ubicación más prometedoras, se lograron catalogar 101 combinaciones viables que se encontraban dentro de rangos aceptables, identificando como áreas principales San Juan, La Descubierta, Las Matas de Farfán y El Llano. No obstante, la validación de estas combinaciones está directamente relacionada con la capacidad de inversión en los nuevos repertorios identificados, considerando aspectos logísticos, de producción, técnicos y otros.

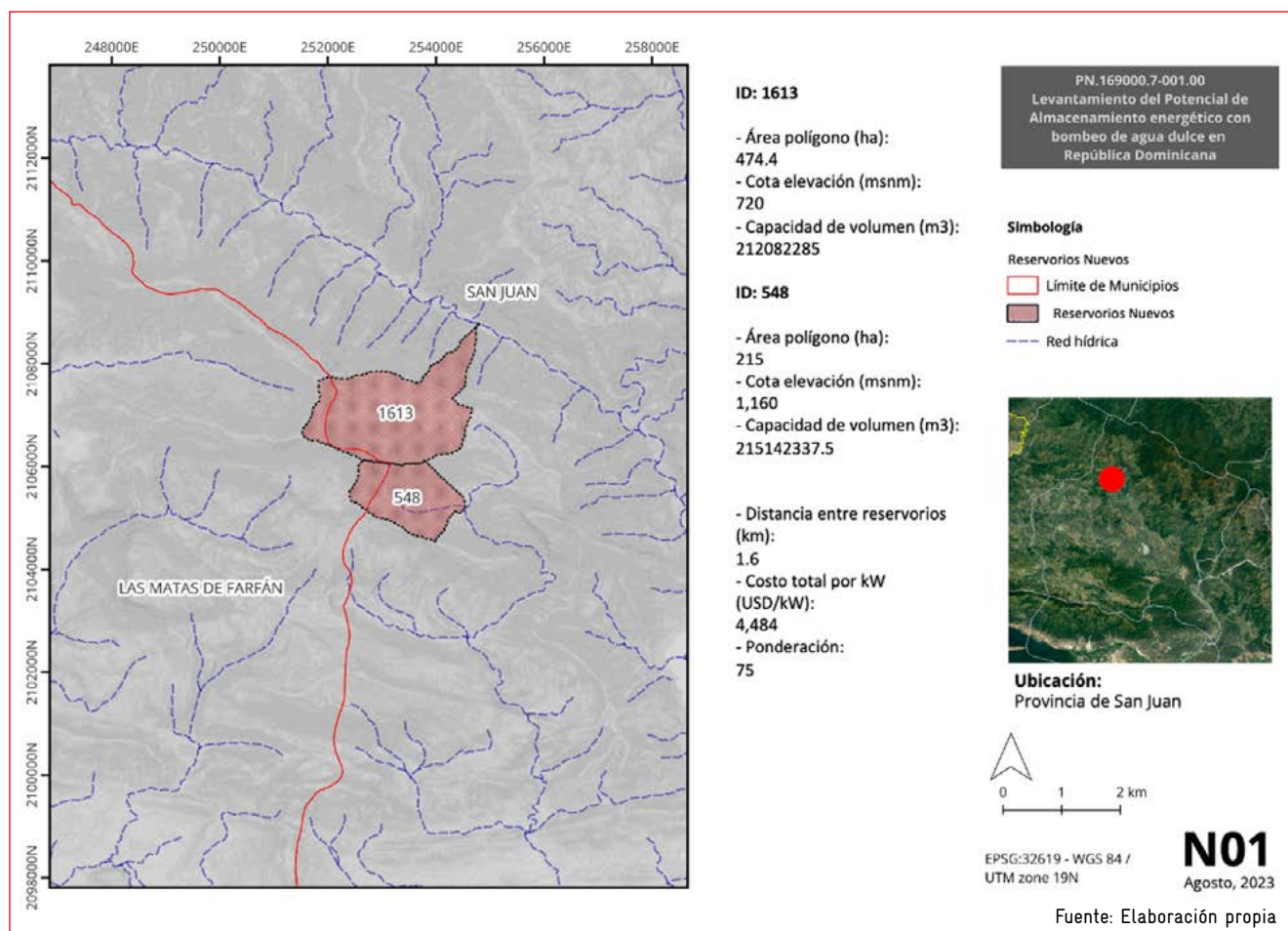


Figura 3. Reservorio nuevo en la Provincia San Juan (ID 1613-548).

En relación con el potencial instalado se estimó 2.76 GW de potencia instalable de centrales de bombeo en República Dominicana, si se consideran todos los proyectos propuestos evaluados; y en relación con los costos de instalación estimados, los sitios calificados con “potencial alto” presentan un rango de costo total estimado desde USD 1,896/kW a USD 5,112/kW.

Por último, tomando en cuenta los resultados obtenidos, se proponen futuros trabajos que pueden dar mayor certeza del potencial de esta tecnología en el país para profundizar y

considerar otras variables. Entre ellas se pueden estudiar los impactos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos en embalses de almacenamiento, identificar reservorios potenciales menores para la construcción de presas, una evaluación técnico-económica de reservorios de almacenamiento, una optimización de embalses sobre o bajo relieve para la habilitación de reservorios de almacenamiento, y, por último, la verificación en terreno de las condiciones geográficas analizadas e ingeniería de detalle.

1. INTRODUCCIÓN

An aerial photograph showing a large concrete dam and a reservoir. The dam is a long, straight wall across a valley. The reservoir is a large body of water behind the dam. The surrounding landscape is hilly and covered in dense green forest. In the foreground, there are some buildings and a road near the dam. The sky is blue with some clouds.

En el marco del Proyecto Transición Energética, bajo el componente de Integración de Energías Renovables Variables y Planificación Energética, la GIZ, el Ministerio de Energía y Minas (MEMRD) y la Empresa de Generación Hidroeléctrica Dominicana (EGEHID) presentan este informe que tiene como objetivo hacer un levantamiento del potencial de almacenamiento energético con bombeo de agua dulce en toda la geografía de República Dominicana utilizando una metodología aplicada en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

La aplicación de la metodología diseñada permitió determinar el potencial de almacenamiento con bombeo de agua dulce incluyendo las distintas configuraciones de acuerdo con los embalses existentes según era el caso (por ejemplo, dos existentes, sólo uno existente y un terreno detectado para construcción o dos terrenos detectados para construcción) y la identificación de nuevas áreas y potenciales. También, se incluyeron consideraciones técnicas, ambientales y sociales asociadas a la construcción de este tipo de centrales en un terreno determinado.



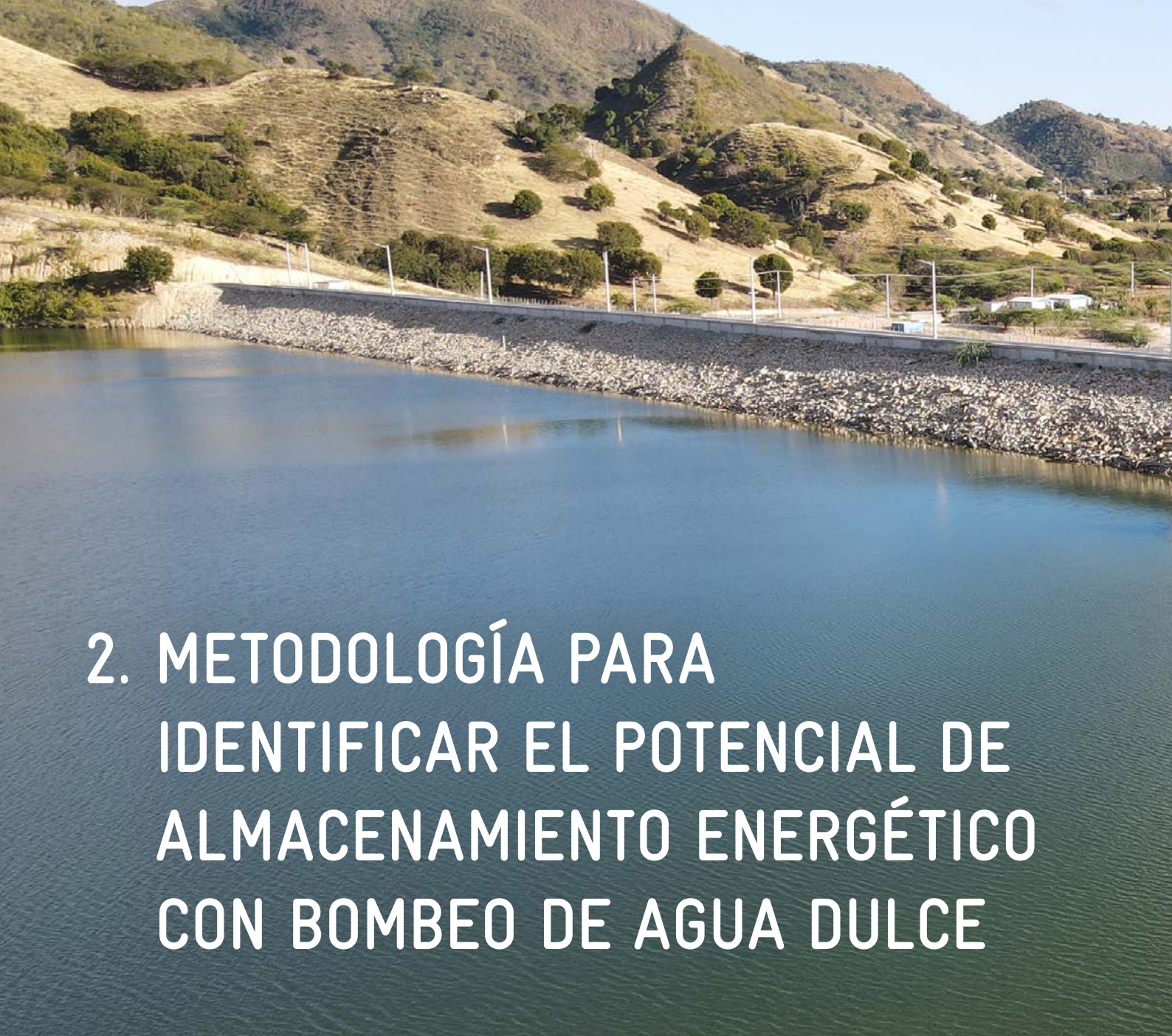
La estructura del informe es la siguiente, en el capítulo 2 se presenta la metodología con las consideraciones generales, el detalle de las etapas y los criterios y métodos aplicados.

En el capítulo 3 se presenta la implementación y aplicación de los productos de geoprosos y la construcción de base de datos.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos respecto al potencial de almacenamiento energético con bombeo de

agua dulce, incluyendo la capacidad de generación y ubicación geográfica asociada.

En el capítulo 5 se presenta el análisis de reservorios potenciales catastrados en estudios previos y, finalmente, en el capítulo 6 se presentan los comentarios finales y las recomendaciones de pasos futuros.



2. METODOLOGÍA PARA IDENTIFICAR EL POTENCIAL DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO CON BOMBEO DE AGUA DULCE

2.1 Consideraciones generales

Para definir la localización de las zonas con potencial de almacenamiento energético con bombeo de agua dulce, en lo adelante “hidrobombeo”, en República Dominicana, la representación del estudio debe ser específica, medible y replicable. Esto implica abordar los siguientes aspectos:

- Identificación de las áreas con alto y bajo potencial para la instalación de puntos de hidrobombeo en República Dominicana.
- Optimización de la ubicación de los puntos potenciales de hidrobombeo en función a diversos criterios y variables cuantificables.

- Consideración de criterios técnicos, socioeconómicos y ambientales para la identificación de los de puntos potenciales de hidrobombeo.
- Claridad en la presentación de información técnica para la toma de decisiones en la planificación y gestión del recurso.

2.2 Etapas metodológicas

Se construye una metodología para reconocer y compilar las diferentes bases de datos e información geográfica disponible para, posteriormente, establecer criterios de preevaluación, prioridad y análisis multicriterio. De esta forma, se busca definir los potenciales de almacenamiento con bombeo de agua dulce.



Se construye un indicador cuya articulación metodológica es mixta, tanto cualitativa como cuantitativa. Sin embargo, al tener como objetivo la construcción de una herramienta estadística, la metodología se basa en la aplicación cuantitativa de las bases de datos disponibles.

En términos instrumentales, se considera el apoyo de instrumentos de análisis geoespacial mediante software SIG (ArcGIS 10.5 y QGIS), cuyo proceso podrá ser evaluado a posterioridad tanto por software de pago como de licencia abierta. De forma complementaria, las capas poligonales se procesan para poder ser consultadas, de forma referencial, mediante el software Google Earth.

En términos operacionales, la metodología se dividió de acuerdo con lo señalado en la siguiente tabla.

Tabla 1. Cuadro de articulación metodológica

Cualitativos	Cuantitativos
1. Etapa previa a la aplicación y análisis: Revisión de literatura y estudios comparados para la identificación de las características físicas de embalses potenciales (demandas de servicio)	2. Análisis de criterios de preevaluación. 3. Análisis de criterios de prioridad. 4. Análisis multicriterio.

Fuente: Elaboración propia

2.3 Criterios y método

Dentro de los criterios, se identifican 2 tipos: los criterios mínimos que deben cumplir los sitios para ser considerados, denominados criterios de preevaluación, y los utilizados para priorizar y/o caracterizar los sitios estudiados, denominados criterios de prioridad.

En un primer barrido se utilizan los criterios de preevaluación para identificar el “punto de partida” de los sitios potenciales a evaluar. Posteriormente, se ordenan estos sitios en función de los criterios de filtro en distintas categorías.

Para el caso de las centrales hidroeléctricas existentes, se considera las que son propensas a reconvertirse a centrales de bombeo, tanto para los criterios de preevaluación como para los de prioridad.

Los criterios se construyen en base a la información disponible y referencias de estudios comparables. La fuente de esta información y su suministro fue obtenida por la contraparte técnica y contrastada con otras fuentes de información libre e imágenes satelitales. En la siguiente tabla, se definen las fuentes de suministro e información:

Tabla 2. Fuente de suministro e información

Nombre	Tipo	Fuente
Información topográfica del país	SIG. Modelo de elevación digital (DEM).	Información proporcionada por la contraparte técnica en base a diferentes fuentes de información. Por ejemplo: mapageneral.mineria.gob.do sig.ambiente.gob.do
Cuerpos de agua naturales y artificiales (incluyendo presas existentes)	SIG. Capa poligonal con áreas y características físicas básicas.	
Red hídrica	SIG. Capa lineal con red hídrica en base a la geografía del área de estudio. Esta capa incorpora información básica sobre el tipo de red hídrica (si es permanente y/o temporal).	
Límites administrativos	SIG. Capa poligonal que incorpora información de las regiones, provincias y municipios del país.	
Áreas de riesgo	SIG. Capa poligonal con áreas de restricción y protección en el país. Esta capa incorpora información sobre el tipo de área de protección y la Ley y/o decreto que lo salvaguarda.	
Líneas de tensión eléctrica	SIG. Capa lineal con información de líneas electrificadas. Esta capa incorpora información del nombre, tipo y voltaje existente.	
Riesgo de inundaciones	SIG. Capa poligonal con información de las áreas oficiales de inundación catastradas a nivel país.	
Fallas geológicas	SIG. Capa lineal con información de las diferentes fallas geológicas, el tipo de falla y el nivel de riesgo según información oficial en el país.	
Concesiones mineras	SIG. Capa poligonal con información de los diferentes tipos de concesiones mineras, tanto de Explotación como los requerimientos de explotación presentes en el país.	

Nombre	Tipo	Fuente
Centrales hidroeléctricas existentes	SIG. Capa de puntos que incluye información referencial con la ubicación de centrales existentes según el catastro presente en el estudio de CESEL (2015).	Levantamiento de consultora en base a la información catastrada a través de OpenStreetMap y Google Earth, así como información proporcionada por la contraparte técnica en base a diferentes fuentes de información.
Subestaciones	SIG. Capa de puntos que incluye información referencial con la ubicación de subestaciones eléctricas existentes.	
Caminos y rutas oficiales	SIG. Capa lineal que incluye información del tipo de camino existente según imágenes satelitales.	
Levantamiento de costos	Levantamiento de datos en función al informe de GIZ et al. (2020), actualizado y adaptado.	Levantamiento de consultora en base a GIZ et al. (2020) Desarrollo de metodología aplicada en sistemas de información geográfica para identificar potencial de centrales de bombeo con agua de mar en Chile.

Fuente: Elaboración propia

2.3.1 Esquema metodológico

La metodología considera tres etapas de evaluación. En una primera etapa, los criterios de preevaluación tienen como objetivo establecer una base que identifique las condiciones mínimas para la implementación de reservorios con potencial de hidrobombeo. En una segunda etapa, los criterios de prioridad tienen como objetivo seleccionar aquellos reservorios más aptos según condiciones específicas para el país. En una tercera etapa, en el análisis multicriterio, tiene como objetivo la construcción de

una herramienta que determine el potencial y prioridad de unos reservorios por sobre otros.

Esta secuencia de evaluación permite realizar un análisis en diferentes escalas de estudio. De esta forma, se pueden identificar en etapas tempranas del estudio, reservorios potenciales con diferentes grados de aceptabilidad.

Como estructura general se diseña el siguiente esquema metodológico:

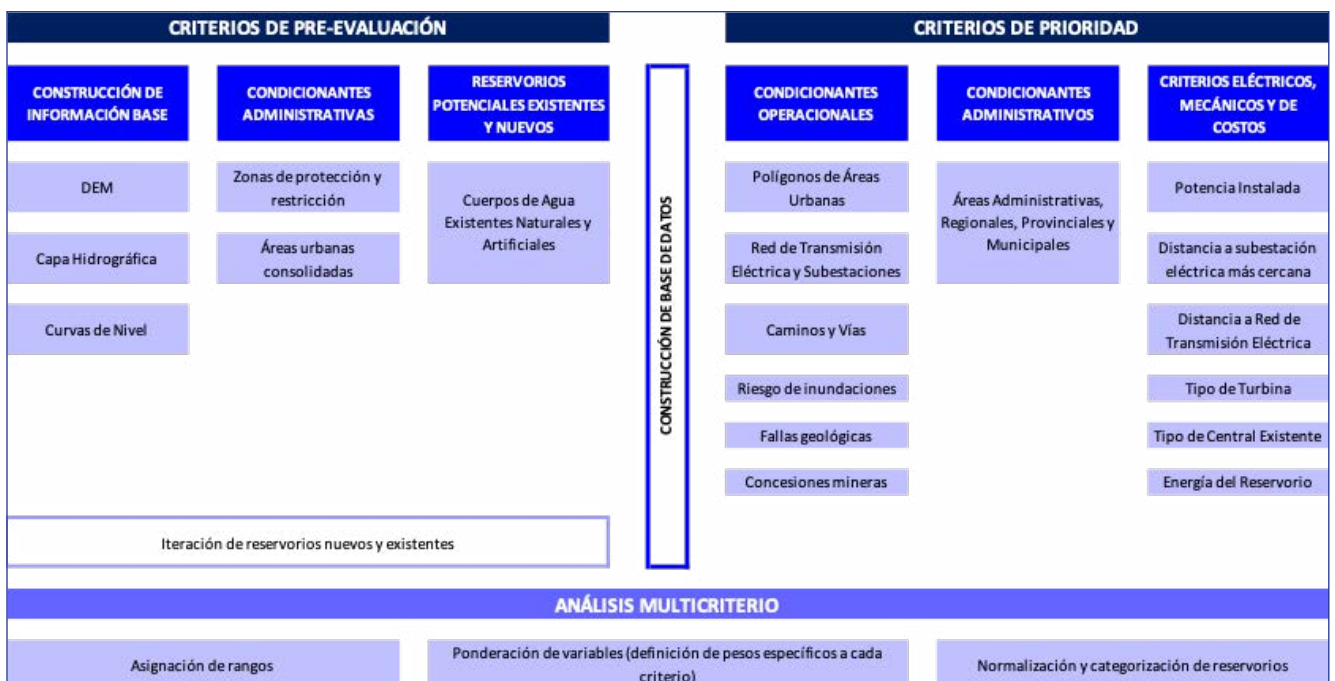


Figura 4. Esquema metodológico y etapas.

Fuente: Elaboración propia

Criterios de Preevaluación:

■ Construcción de información base

El estudio inicialmente se enfoca en la construcción, procesamiento y limpieza de datos de las capas geográficas obtenidas.

Comienza con la utilización de una capa base de DEM, la cual es proyectada mediante el método Universal Transverse Mercator (UTM) y se ajusta al sistema de referencia de coordenadas EPSG:32619 - WGS 84 / UTM zona 19N.

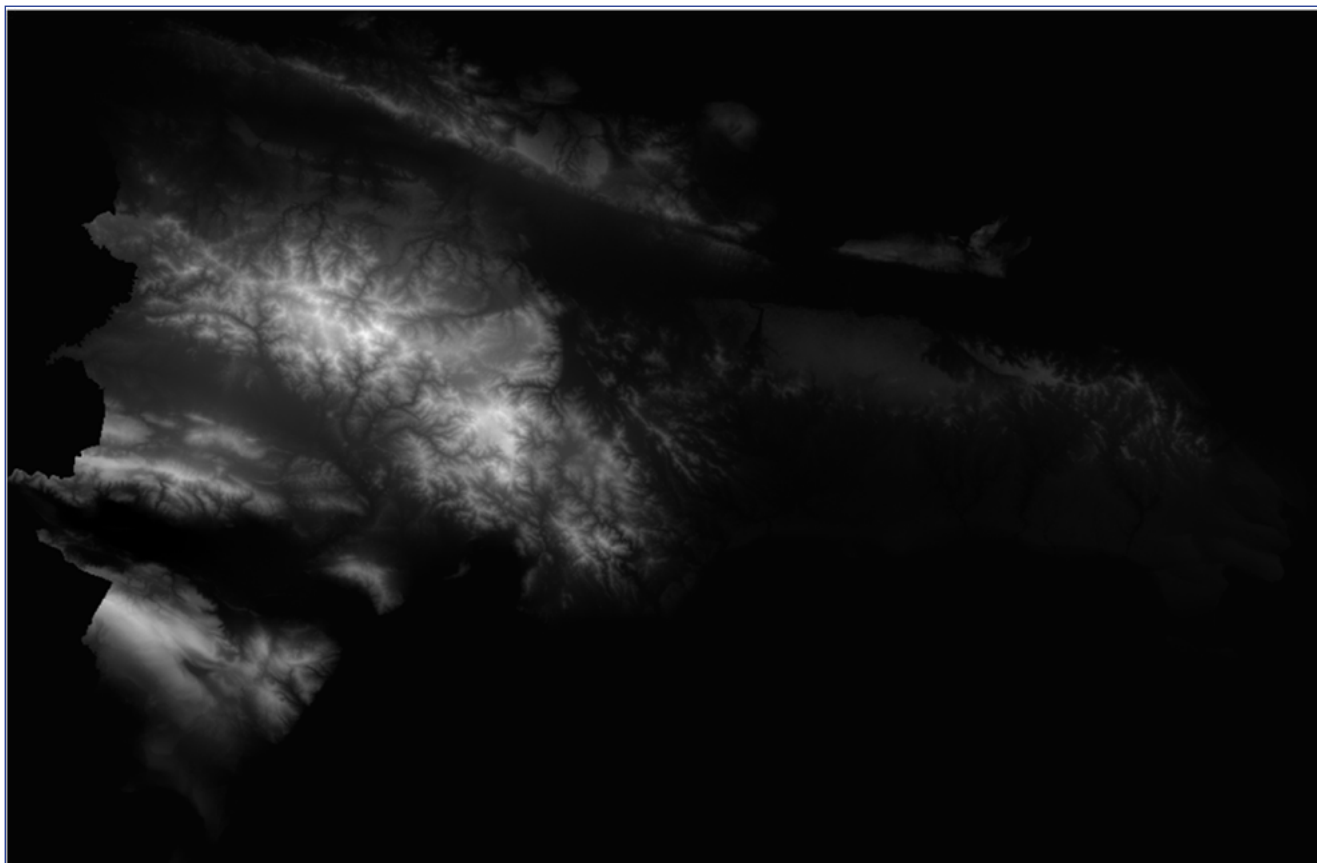


Figura 5. Imagen DEM extraída para República Dominicana.

Fuente: Elaboración propia

En primera instancia se determina, qué áreas dentro de la geografía del país tienen capacidad para funcionar como reservorios. Como característica fundamental, estos reservorios base (expresados como polígonos) deben estar conectados a la red

hídrica catastrada. Por lo tanto, entre ambas capas debe existir una unión que, como geoproceso, se expresa en el siguiente esquema.

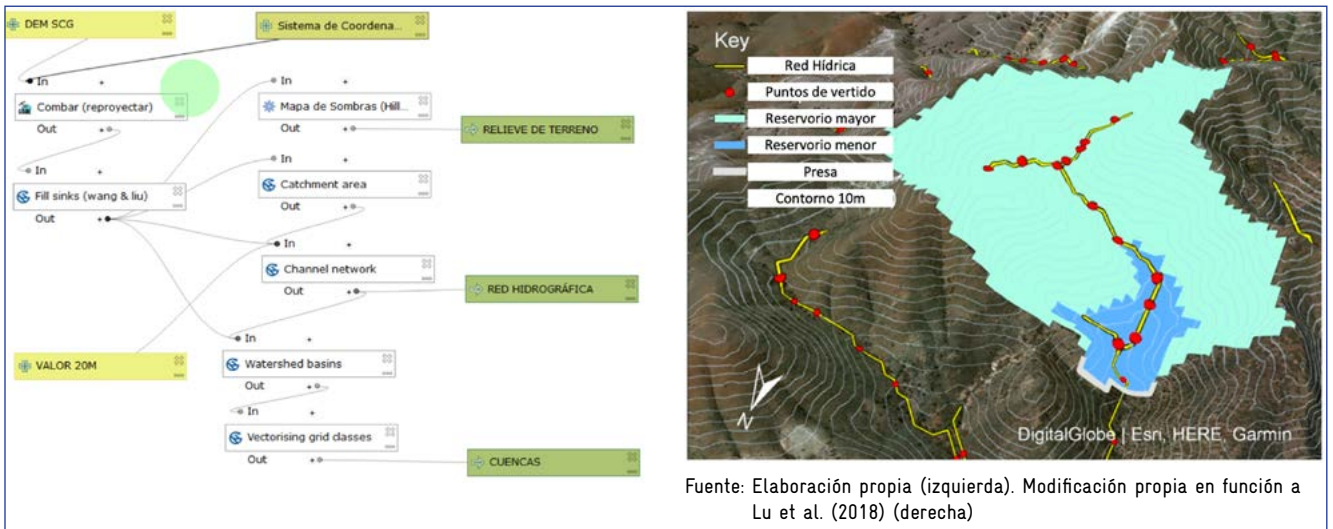


Figura 6. Esquema de geoproceso automatizado aplicado en software SIG (izquierda); Esquema de levantamiento de reservorio (derecha).

El proceso automatizado expresado en la Figura 6 permite que, a partir de la capa DEM (en figura se encuentra expresada como “DEM SCG”) se analicen las características del relieve del terreno, sus pendientes, la red hidrográfica, el direccionamiento de la red hidrográfica y, por último, se determinen las cuencas y/o microcuencas, que darán paso a determinar los reservorios base (o también denominados reservorios mayores). Se debe tomar

en cuenta que la configuración de estos reservorios base toma en cuenta el supuesto teórico que cada uno de ellos, por sí solos, son capaces de contener un volumen de agua “X”. Sin embargo, con la construcción de muros de contención, cada uno de estos se pueden dividir en reservorios menores, tal como lo muestra la Figura 6 (derecha).

El resultado obtenido, en una escala nacional, permite el registro de 10,542 reservorios base conectados a la red hídrica. Estos se encuentran expresados en la siguiente figura:

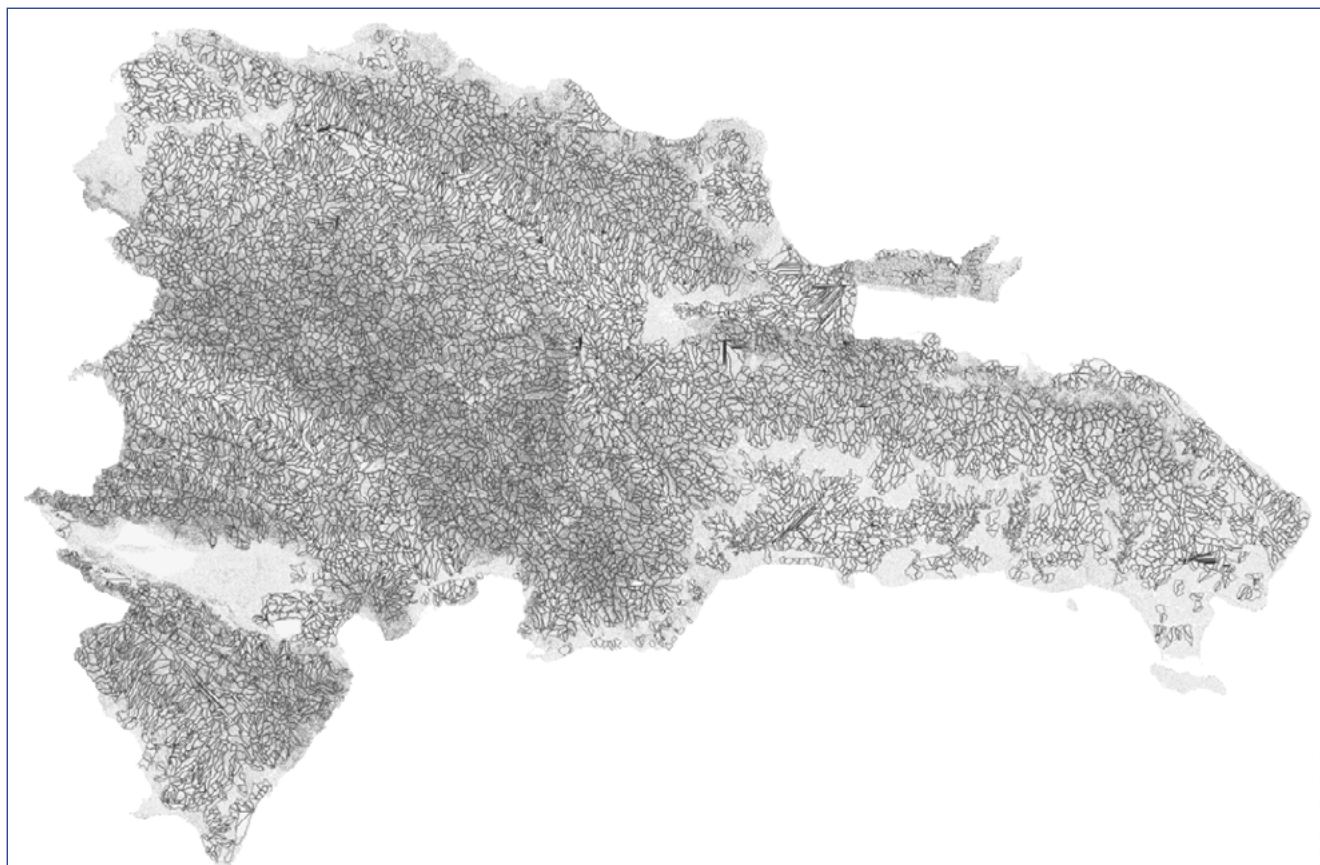


Figura 7. Levantamiento de reservorios base en una etapa inicial.

Fuente: Elaboración propia

Para mejorar el manejo de datos, se aplicaron criterios que permiten la exclusión de áreas y la disminución de reservorios base. Con ello, se superpuso el filtro “Áreas de protección y exclusión”, eliminando 4,010 reservorios base, tomando como resultado total 6,532 reservorios base.

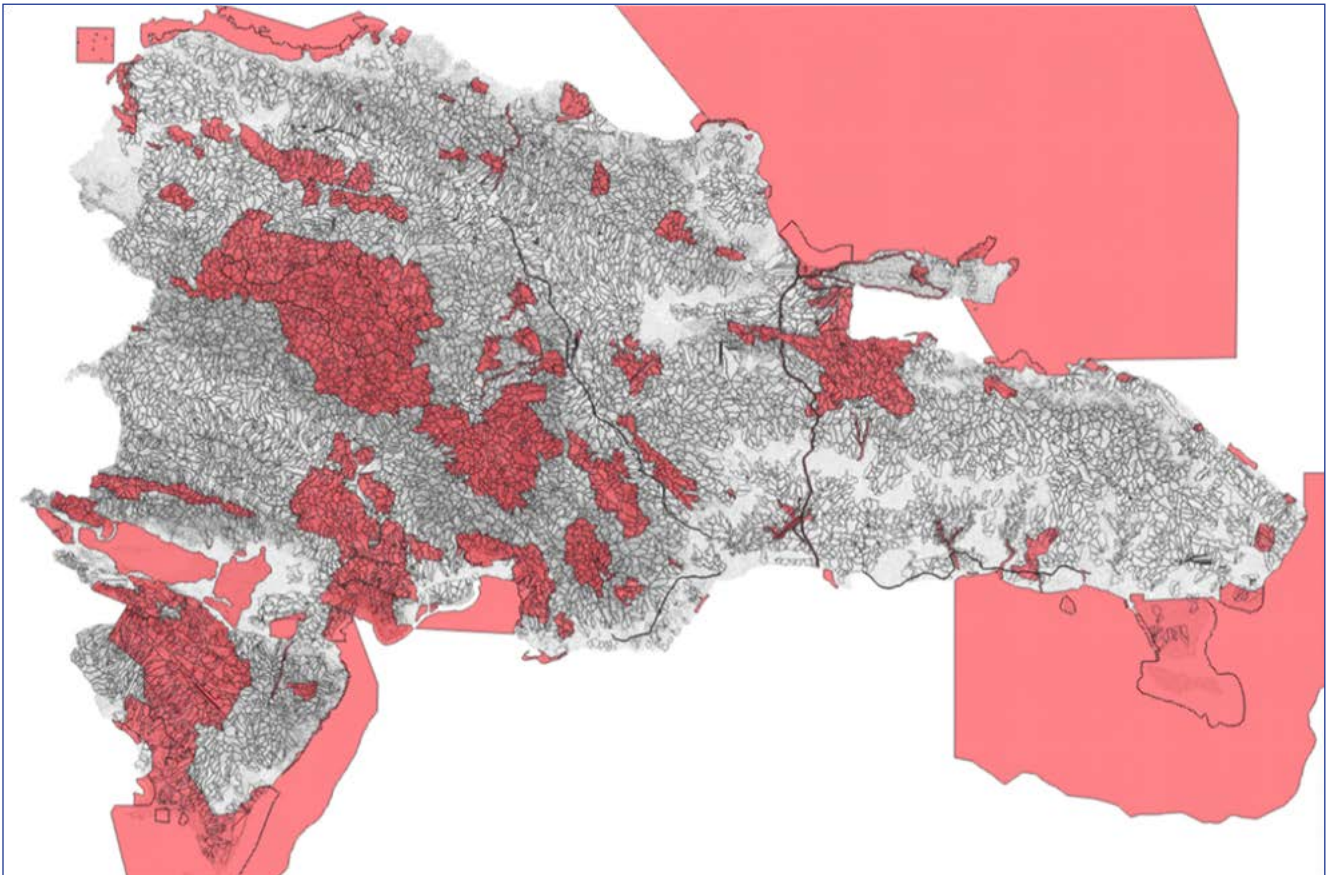


Figura 8. Aplicación de filtro “áreas de protección y restricción” (en rojo).

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se aplicó otro filtro de exclusión vinculado con la presencia de áreas urbanas consolidadas. En este sentido, la regla principal fue la exclusión de reservorios base en áreas con

cierto grado de consolidación. De esta manera, se identificaron 2,648 polígonos en áreas urbanas consolidadas y la disminución de los reservorios base totales a 3,848 polígonos.

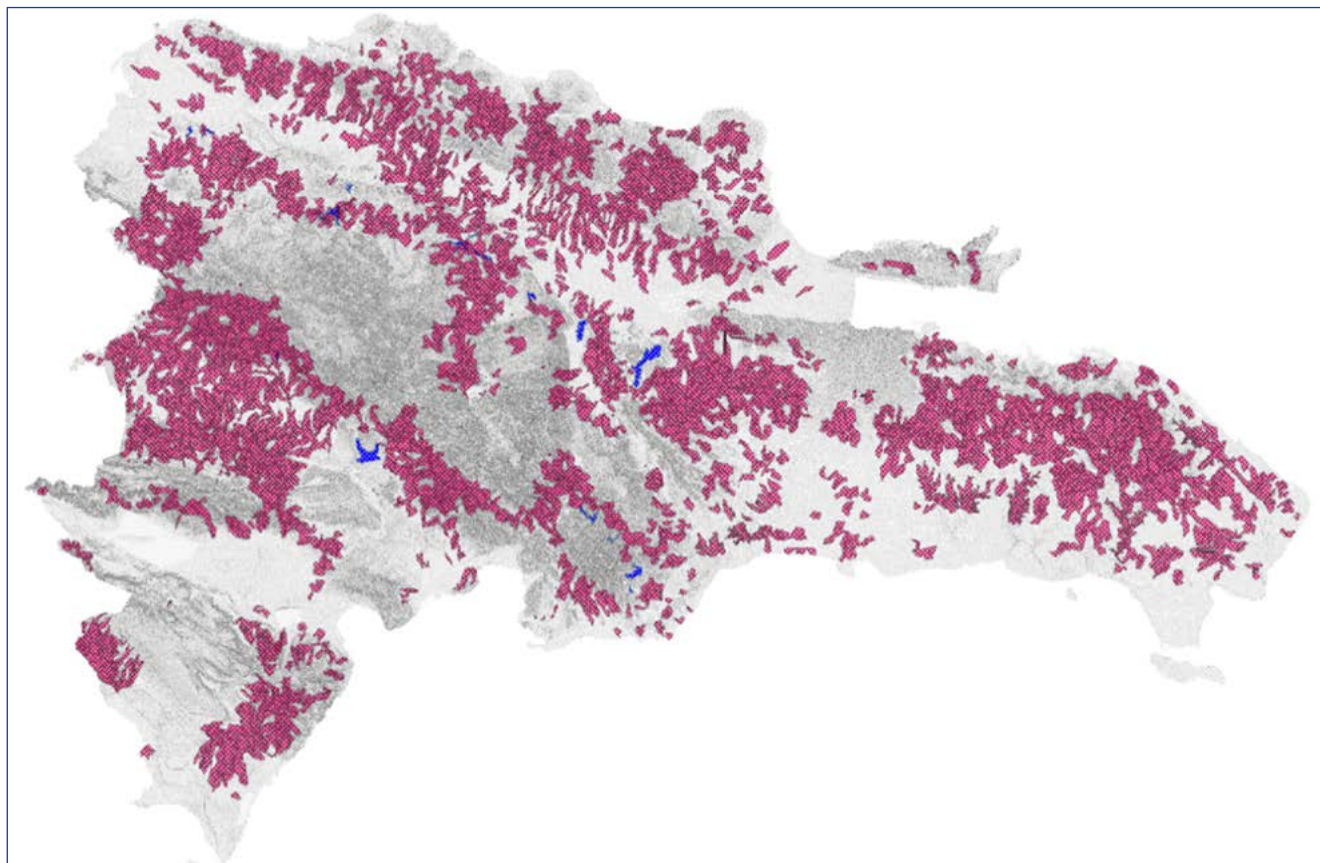


Figura 9. Reservorios base para la construcción de la base de datos (3,848 polígonos).

Fuente: Elaboración propia

En última instancia se realizó una limpieza de datos para la construcción de la base de datos definitiva. Con ello, se identificaron polígonos con errores de geometría y con inconsistencias respecto a las imágenes satelitales disponibles. En algunos casos, los polígonos con errores de geometría fueron corregidos por medio de procesos semiautomatizados. En otros casos, los errores se mantuvieron producto de los procesos automatizados realizados anteriormente. Estos últimos fueron excluidos de la muestra final.

De forma paralela, se incluyó información de las elevaciones máximas y mínimas de cada polígono a partir de las curvas de nivel, expresadas en metros sobre nivel del mar (msnm). En etapas posteriores esta información se incluye en la base de datos. Desde esta capa, se realizan geoprocursos que permitirán incluir información de, al menos, cuatro criterios: (1) distancia entre reservorios, (2) salto/diferencia en elevación entre la captación y el reservorio, (3) ratio entre salto y distancia, (4) pendiente de la ladera.

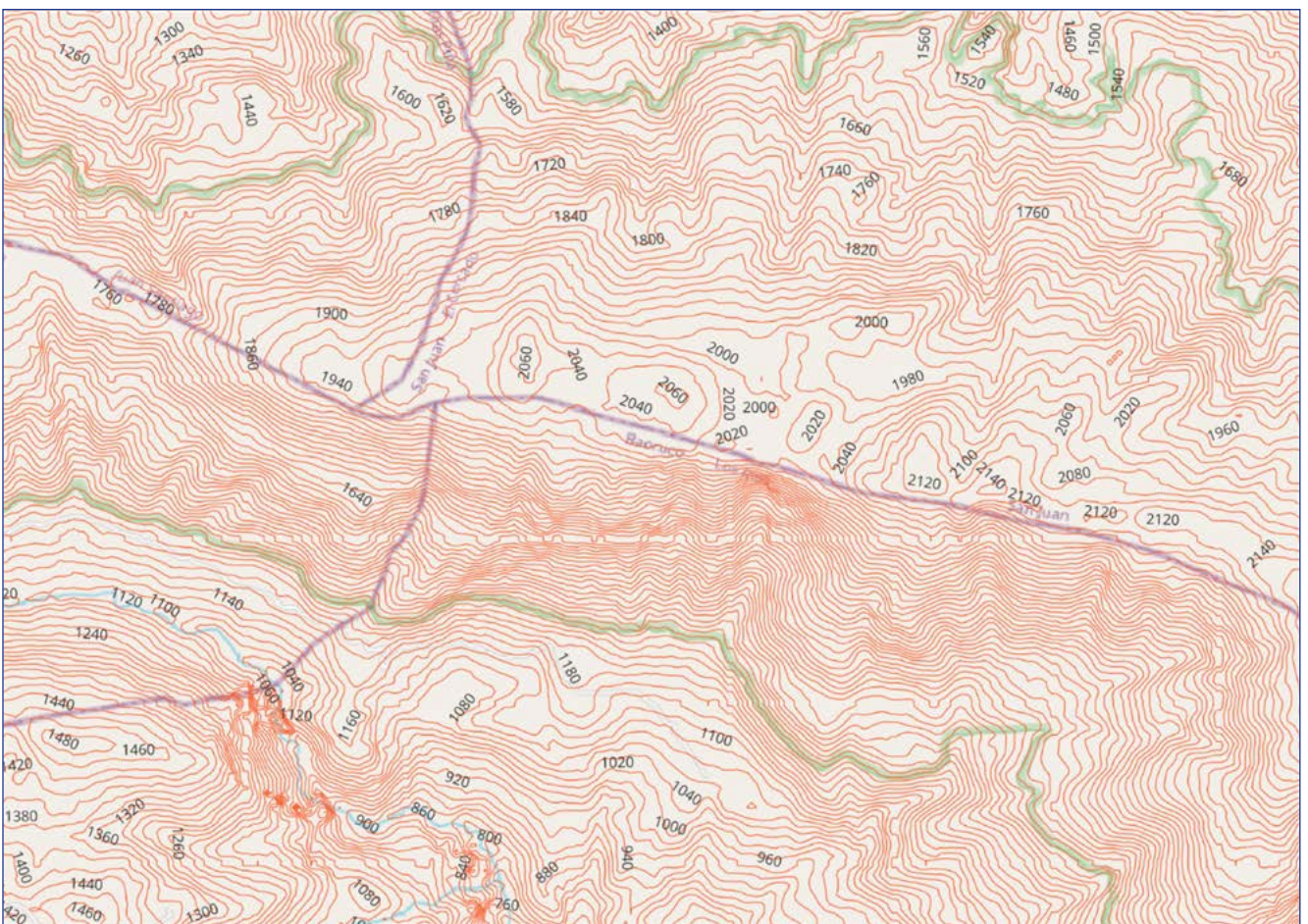


Figura 10. Detalle de capa de cotas de elevación, cercano a Loma en Gajo Medio.

Fuente: Elaboración propia

■ Reservorios potenciales existentes y nuevos

Considerando los puntos anteriores, se pueden identificar aquellas áreas que mantienen características físicas relevantes para constituirse como reservorios potenciales. En esta etapa, se suma el contenido de la red hidrológica de República Dominicana, así como sus cuerpos de agua naturales y artificiales.

■ Iteración de reservorios nuevos y existentes

Para la construcción de la base de datos y para la aplicación de los criterios de prioridad, la información construida se divide en los dos escenarios: polígonos de reservorios nuevos y polígonos de reservorios existentes.

Considerando que las centrales de hidrobombeo funcionan relacionando dos reservorios con diferencias de nivel (salto), la construcción de la base de datos debe estar relacionada en base a la iteración entre dos polígonos. Para el caso de los reservorios nuevos se contabilizan 3,848 combinaciones (entre dos reservorios nuevos) y para los reservorios existentes se consideran 1,261 combinaciones (entre una presa existente y un reservorio nuevo)¹.

Criterios de Prioridad:

■ Condicionantes operacionales

Estas refieren a información que permite cualificar en diferentes categorías los reservorios identificados y se vinculan con:

- Radios de cercanía a polígonos urbanos
- Distancia respecto a la red de transmisión eléctrica y subestaciones
- Distancia a caminos y vías según la jerarquía de estos
- Existencia de riesgo de inundación en el polígono analizado
- Presencia de falla geológica en el polígono analizado
- Presencia de concesión minera en el polígono analizado

Respecto a la información de las centrales existentes, se obtiene a partir del estudio “Contratación de una Consultoría Encargada de Completar las Bases de Datos de las Series Hidrológicas para Determinación de la Energía Disponible en las Centrales Hidroeléctricas” (2015) elaborado por CESEL Ingenieros. En este se presenta información técnica detallada de cada una de las centrales hidroeléctricas existentes en el sistema. En base a esta información se puede identificar qué centrales cuentan con mejores prospectos para ser convertidas a centrales de bombeo, en función de los costos involucrados. En la siguiente tabla se puede ver detalle de las características del equipamiento electro-mecánico de las centrales.

1 La diferencia entre las combinaciones entre reservorios nuevos y existentes se debe a que, en el caso de los reservorios existentes, solo se consideran los polígonos cercanos a estos cuerpos de agua que están a una altitud superior.

Tabla 3. Características de equipamiento electromecánico.

	Central Hidroeléctrica	Potencia instalada (MW)	Tipo	Año inicio de operación	Tipo de turbina	N° de grupos	Carga neta (m)	Caudal de diseño (m³/s)	Velocidad específica	Eficiencia generador	Eficiencia turbina	Potencia continua (kW)
1	Rosa Julia	0.80	I	2005	Kaplan	1	10.50	10.00	732	95.2	81.7	801
2	Rincón	10.10	IV	1978	Francis	1	40.50	30.00	300	97.0	84.8	9,797
3	Hatillo	8.10	IV	1984	Francis	1	30.60	30.00	279	96.8	87.8	7,65
4	Aniana Vargas	0.60	I	2003	Francis	2	40.00	0.90	214	93.0	86.6	569
5	Pinalito	50.00	II	2009	Pelton	2	517.00	5.18	0	97.4	90.0	46,019
6	Río Blanco	25.00	II	1996	Francis	2	256.88	5.48	100	97.1	92.7	24,835
7	Contraembalse M.	3.20	IV	1998	Francis	2	15.50	12.00	341	96.2	91.2	3,201
8	Monción	52.00	III	2002	Francis	2	124.00	22.90	158	97.4	94.0	50,977
9	López Angostura	18.00	II	1987	Francis	1	37.67	53.00	239	97.2	92.6	17,496
10	Baguaque	1.20	I	1995	Ossberger	2	78.00	0.97	67	94.4	76.6	1,067
11	Tavera	96.00	III	1973	Francis	2	110.00	57.10	160	98.0	80.5	97,109
12	Jimenoa	8.20	II	1954	Francis	1	212.70	4.60	82	96.6	88.5	8,204
13	Brazo Derecho	2.75	I	2014	Kaplan	1	24.50	13.00	451	92.2	92.4	2,66
14	Sabaneta	6.35	IV	1981	Francis	1	65.00	11.25	226	96.6	91.7	6,35
15	D. Rodríguez	3.60	I	2004	Francis	2	54.40	3.70	259	96.1	88.7	3,364
16	El Salto	0.62	I	1995	Ossberger	1	77.00	1.00	78	94.4	80.0	570
17	Sabana Yegua	13.00	IV	1980	Francis	1	66.90	24.00	179	98.0	83.0	12,804
18	Magueyal	3.12	I	2008	Francis	2	60.00	3.15	214	96.1	85.0	3,026
19	Palomino	83.00	II	2012	Francis	2	337.50	13.35	84	97.8	92.8	81,133
20	Los Toros	9.40	I	2001	Francis	2	97.52	5.50	124	96.9	91.4	9,312
21	Las Damas	7.50	I	1967	Pelton	1	304.00	2.81	20	96.7	89.6	7,253
22	Jigüey	98.00	III	1992	Francis	2	214.00	26.00	123	98.0	92.2	98
23	Aguacate	52.00	II	1992	Francis	2	170.00	17.00	158	97.5	91.8	50,7
24	Valdesia	52.00	III	1978	Francis	2	67.00	44.00	219	97.4	89.1	50,18
25	Las Barías	0.85	IV	2009	Kaplan	1	9.90	12.90	782	95.6	87.5	889
26	Nizao	0.33	I	1994	Ossberger	1	10.00	4.60	154	93.0	75.0	315
27	Los Anones	0.11	I	1999	Francis	1	7.00	1.80	559	92.5	87.0	99

Fuente: CESEL, 2015

■ Condicionantes administrativas

En esta etapa, se incluye información sobre las condicionantes administrativas existentes en el país. La información resultante se divide en capas de regiones, provincias y municipios. De esta manera, se puede desagregar la información en diferentes escalas, pudiendo determinar qué regiones tienen mayor potencial de hidrobombeo. Este filtro solo tiene carácter informativo.

■ Criterios eléctricos, mecánicos y de costos

Esta etapa se vincula con un alcance técnico-económico que se encuentran asociados al funcionamiento de las potenciales centrales. En el numeral 2.3.2 se encuentra mayor detalle.

Análisis Multicriterio:

Esta se construye como una herramienta que permite una categorización, considerando múltiples variables y criterios. Para esto, se construyó una base de datos tomando como principal insumo los criterios de prioridad y, así, aplicar una serie de filtros para realizar la evaluación final. En términos operacionales,

el proceso de análisis multicriterio se puede dividir en tres etapas: (1) asignación de rangos, (2) ponderación de variables y (3) normalización y categorización de reservorios.

■ Asignación de rangos

Antes de proceder al cálculo y asignación de ponderaciones a las variables bajo estudio, se llevó a cabo un análisis de los intervalos de valores presentes en la base de datos. Esto permitió explorar el conjunto completo de información, con miras a calibrar posteriormente según los intervalos óptimos identificados en la revisión bibliográfica. Además, con el propósito de gestionar de manera eficiente el estudio de los potenciales reservorios, se aplican filtros en las primeras etapas del análisis multicriterio para excluir aquellos reservorios que se sitúan en los extremos de los intervalos y que no cumplen con las condiciones óptimas de desarrollo.

A modo de síntesis, en la siguiente tabla se muestra el resumen de definición de criterios y valores incluidos en las diferentes etapas de medición.

Tabla 4. Definición de criterios y valores incluidos en las diferentes etapas de medición.

Criterio	Unidad	Valor mín.	Valor máx.	Rango de valores	Tipos registrados	Descripción	Fuente
Salto	m	40	440	40 - 440		Diferencia de elevación entre la captación y el reservorio	Rogean et al. (2017)
Superficie	ha	Sin rango de valores					
Volumen	m ³	8,000	∞				Rogean et al. (2017)
Distancia entre reservorios	m	0	5,000	229 - 5,000			Rogean et al. (2017)
Salto / Distancia	ratio	0.1	∞	0.008 - 0.383	∞	∞	Görtz et al. (2022)
Distancia a subestación	m	0	20,000	384 - 79,400			Krassakis, et al. (2023)
Distancia a red de transmisión eléctrica	m	0	20,000	713 - 83,752			Krassakis, et al. (2023)

Criterio	Unidad	Valor mín.	Valor máx.	Rango de valores	Tipos registrados	Descripción	Fuente
Distancias a vías	m	0	∞	0.2 – 8,043	Motorway	Carretera principal dividida de acceso restringido, normalmente con 2 o más carriles de circulación. Equivalente a la autopista.	∞
					Trunk	Carreteras de alta importancia que no sean autopistas (no necesariamente tiene que ser una carretera dividida)	∞
					Primary	Carreteras importantes en un tercer orden a nivel nacional (a menudo une ciudades más grandes)	∞
					Secondary	Carreteras importantes en un cuarto orden a nivel nacional (a menudo une ciudades)	∞
					Tertiary	Carreteras importantes en un quinto orden a nivel nacional (a menudo une ciudades y pueblos más pequeños)	∞
					Unclassified	Caminos de paso menos importantes en un sistema nacional, caminos secundarios de una clasificación inferior a los terciarios, pero que a menudo une pueblos y aldeas. Se ocupa la clasificación "unclassified" lo cual se desprende del sistema de carreteras del Reino Unido. Su clasificación homóloga es "camino"	∞
					Construction	Carretera en construcción	∞
					Track	Caminos usados mayoritariamente para actividades agrícolas o forestales. A menudo son caminos accidentados, con superficies sin pavimentar.	∞
Cuerpo de agua existente	∞	Existe o no un cuerpo de agua en polígono catastrado	∞	Permanente	Existe cuerpo o red de agua de forma permanente	∞	
				Temporal	Existe cuerpo o red de agua de forma temporal	∞	
				0	No existe registro de cuerpo o red de agua existente. Sin embargo, existen características geográficas para definir una red hídrica	∞	

Fuente: Elaboración propia

■ Ponderación de variables

Durante este proceso, se asignó a cada variable o criterio un peso específico que reflejará su importancia relativa en la toma de decisiones. En la fase de revisión bibliográfica, estos pesos se obtuvieron de fuentes internacionales de referencia. Luego, en una etapa de adaptación, estos pesos fueron ajustados para reflejar la realidad del proyecto y del país en cuestión. La asignación de ponderaciones se llevó a cabo en una escala de 2 a 10, excluyendo la ponderación “cero”. Esta omisión es justificada por la aplicación de filtros en la etapa anterior (asignación de rangos). Una explicación más detallada se encuentra en la sección 4.2.1.

■ Normalización y categorización de reservorios.

Una vez que se han asignado las ponderaciones, se procede a clasificar cada reservorio en función de la evaluación que le corresponda de acuerdo con los criterios y pesos correspondientes. Esto conlleva a agrupar los reservorios en 5 niveles de relevancia, empleando intervalos numéricos para expresar su calificación relativa. En la sección 4.2.2. se detalla este ítem.

Tabla 5. Niveles de relevancia de los reservorios.

Nivel	Evaluación
Potencial alto	81 – 100
Potencial medio-alto	61 – 80
Potencial medio	41 – 60
Bajo Potencial	21 – 40
Sin Potencial	0 – 20

2.3.2 Cálculo y valoración de criterios eléctricos y mecánicos

Los criterios eléctricos y mecánicos tienen relación con los elementos técnicos asociados al funcionamiento de las centrales hidroeléctricas de bombeo. Estos abarcan desde lo relacionado al funcionamiento mismo de las centrales, como pueden ser las turbinas instaladas, así como también su inserción en el sistema eléctrico y la distancia a las subestaciones más cercanas. En específico, los criterios utilizados son los siguientes:

- **Potencia instalada:** Potencia total instalada (MW) en centrales hidráulicas existentes. Mayor potencia instalada implica una ponderación positiva del lugar.
- **Distancia a subestación eléctrica más cercana:** Se debe establecer un radio de distanciamiento máximo entre el reservorio y las subestaciones existentes. Aquellas fuera del distanciamiento máximo no se deben excluir, sino bajar su ponderación.
- **Distancia a red de transmisión eléctrica:** Se debe establecer un buffer donde se indica la distancia máxima a la cual los reservorios deben estar respecto a la línea de transmisión eléctrica. Aquellas fuera del distanciamiento máximo no se deben excluir, sino bajar su ponderación.
- **Tipo de turbina:** Kaplan, Francis, Pelton u Ossberger. Esta información resulta relevante ya que en el caso de las turbinas Francis es posible utilizarlas de manera bidireccional lo que permite reutilizarlas para el bombeo de flujo aguas arriba. Esto implica que la conversión de estas centrales a centrales de bombeo podría requerir menores inversiones.
- **Tipo de central existente:** Categorías I a IV² según la clasificación señalada en el estudio de CESAL Ingenieros (2015) que toma en cuenta el sistema de conducción y la existencia de regulación diaria o estacional para la producción de energía.
- **Energía del reservorio:** calculado en función del volumen del reservorio superior y el salto de la ubicación potencial por medio de la ecuación:

$$E = \rho g h f V \mu$$

2 Tipo I: Centrales de pasada; Tipo II: Centrales con reservorio de regulación diaria; Tipo III: Centrales con presa de regulación estacional multipropósito y tubería de conducción a presión > 600 m; Tipo IV: Centrales a pie de presa para regulación estacional con conducción a presión < 600 m.

Donde:

E = energía disponible [Joules]

ρ = densidad del agua [kg/m³]

g = aceleración de gravedad (9.81) [m/s²]

h = salto [m]

V = Volumen del reservorio [m³]

f = aproximación del porcentaje utilizable del volumen total
(85%)

μ = eficiencia de generación (aproximadamente 90%)

Este valor se utiliza para poder priorizar reservorios potenciales y mediante el uso de valores típicos de horas de almacenamiento se dimensionarán tamaños estándar de turbinas a usarse.



3. IMPLEMENTACIÓN Y APLICACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE GEOPROCESOS Y CONSTRUCCIÓN DE BASE DE DATOS

En este apartado, se presenta la implementación y aplicación de la metodología basada en SIG para analizar los escenarios en torno al levantamiento de reservorios potenciales en República Dominicana. En este ámbito, la metodología dividió en dos escenarios, tanto para reservorios nuevos como para existentes. Para cada caso, se aplicaron procesos generales y específicos utilizando herramientas SIG.

3.1 Escenarios de estudio

■ Reservorios Nuevos

En el estudio de reservorios nuevos, se realizó un proceso de división de cuencas existentes en microcuencas que pudieran albergar un volumen de agua y estuvieran conectadas a la red hídrica del país, a partir de la capa de red hídrica del país. Para ello, se aplicó un geoproceso que consideró criterios como la capacidad de almacenamiento, la topografía, la disponibilidad de recursos hídricos y la viabilidad técnica. La relación entre dos microcuencas cercanas fue evaluada con el objetivo de determinar su compatibilidad y la posibilidad de crear un nuevo reservorio en la región (proceso explicado gráficamente en figura 3).



■ Reservorios Existentes

El estudio de reservorios existentes se enfocó en las presas conectadas a centrales hidroeléctricas ya establecidas en República Dominicana. Se analizó la relación entre estas presas y las microcuencas circundantes. Para esto se utilizó la información de las presas existentes, evaluando factores como la capacidad de almacenamiento actual de las presas, la superficie en la cual se extiende cada presa y su conectividad. El objetivo era identificar oportunidades de optimización en la gestión de los recursos hídricos y la producción de energía, en relación con nuevos reservorios cercanos a estas.

3.2 Levantamiento de información para la construcción de base de datos

El levantamiento de información se construyó a partir de las tablas de atributos presentes en las capas de información geoespacial disponibles, así como procesos derivados de ellas. La base de datos resultante es esencial para la implementación y análisis de la metodología SIG en el contexto del proyecto. Se consideró una variedad de capas SIG que abarcan información topográfica, hídrica, administrativa, eléctrica y de restricciones, cada una de las cuales contribuye significativamente a la comprensión integral del entorno. Las capas incluidas en el estudio son:

Tabla 6. Descripción de las capas utilizadas para la extracción de datos

Tipo de capa	Nombre de capa ³	Descripción
Topográfica	OR_DEM_Rep.Dominicana	Modelo de elevación digital (DEM) de República Dominicana. Tamaño de pixel 12.5 x 12.5.
	PR_DEM_Rep.Dominicana	Modelo de elevación digital (DEM) de República Dominicana. Tamaño de pixel 12.5 x 12.5. El perímetro de la capa considera la frontera del país junto con la línea de costa. Proceso: recorte y corrección de OR_DEM_Rep.Dominicana.
	PR_DEM_Pendientes	Modelo de elevación digital (DEM) de República Dominicana con información de las pendientes del país expresadas en grados (°).
	PR_LIN_Curvas-nivel	Capa de líneas con información de las curvas de nivel, procesadas cada 20 metros en el país. Esta capa corresponde a información derivada de PR_DEM_Rep. Dominicana.
Hídrica	OR_LIN_Red-hídrica	Capa de líneas con la red hídrica existente en el país. Contiene información de ríos, arroyos y cañadas, categorizadas según si la disponibilidad de estas fuentes es permanente o temporal.
	OR_POL_Lagunas	Polígonos con información de cuerpos de agua existentes en el país de lagos y lagunas, considerando la superficie de cada polígono.
	OR_POL_Presas-existentes	Información de presas existentes en el país con información administrativa y física de las presas. Capa expresada en polígonos.
	OR_POL_Presas-buffer	Polígono que expresa distanciamiento entre la presa y su contexto, considerando un buffer de 250 metros.
	OR_POL_Subcuencas	Polígono de subcuencas existentes en el país. La capa posee información a nivel de cuencas y subcuencas con información de la superficie en cada polígono, expresada en metros cuadrados.
Administrativa	OR_POL_Municipios	Polígonos con información de límites administrativos a nivel regional, provincial y municipal de República Dominicana.
	OR_POL_Ciudades-pueblos	Polígonos con información de las áreas urbanas de ciudades y pueblos de República Dominicana.
	PR_LIN_Caminos	Capa de líneas con información de los diferentes caminos presentes en República Dominicana. La información de esta capa se encuentra categorizada según tipos de rutas.

3 El nombre de cada capa fue modificado con relación a la fuente original.

Tipo de capa	Nombre de capa ³	Descripción
Eléctrica	PR_PNT_Centrales-hidroelectricas	Capa de puntos con información disponible de las Centrales Hidroeléctricas existentes.
	PR_PNT_Subestaciones	Capa de puntos con información de subestaciones existentes según compañía (EDENORTE, EDESTE, EDESUR, ETED).
	OR_LIN_345	Capa de líneas y puntos de la red eléctrica existente en el país. Posee información variable, derivada de las capas SENI_345, SENI_138, 230 y Vértices.
	OR_LIN_230	
	OR_LIN_138	
OR_PNT_Vertices		
Restricción	OR_POL_Restriccion	Polígonos con información de las áreas de protección y restricción existentes en el país. En esta capa se incluye información sobre el nombre de las áreas de protección/restricción, las categorías y subcategorías que representa cada área, junto con los decretos y/o leyes a las cual se vincula cada área de protección/restricción.

Fuente: Elaboración propia

3.3 Aplicación de criterios y limpieza de datos previo a la construcción de la base de datos definitiva

En este apartado se aborda el proceso de aplicación de criterios previos y de realización de una limpieza de los datos antes de construir la base de datos definitiva. La reducción del conjunto de datos original fue esencial para permitir un procesamiento eficiente y para garantizar que los datos y resultados no se sobrestimen.

■ Filtrado inicial de datos

Antes de proceder con la construcción de la base de datos, se reconoció la necesidad de reducir la cantidad de datos disponibles. Dado que el enfoque del estudio involucró la iteración de un gran número de reservorios conectados a la red hídrica en la escala nacional, un total de 10,542 reservorios inicialmente se consideraron para análisis. Sin embargo, debido a la complejidad y los recursos requeridos para relacionar probabilísticamente tal cantidad de reservorios, se optó por aplicar un filtro de exclusión con la capa “Áreas de Protección y Restricción”.

■ Resultado de la limpieza de datos

Una vez aplicado el filtro de exclusión, se calcularon las características específicas de los reservorios resultantes. Con esta etapa de limpieza y filtrado, la cantidad de reservorios se redujo significativamente a 6,532. Estos reservorios, libres de restricciones legales y ambientales, se convirtieron en la base sobre la cual se aplicarían los filtros y ponderación de variables, permitiendo un análisis más enfocado y manejable de los datos.

3.4 Parámetros SIG aplicados a bases de datos

Los parámetros adoptados para la construcción de la base de datos se extrajeron desde las tablas de atributos SIG. Dentro de estos, se incluyen los siguientes:

■ ID de Polígonos:

El ID de polígonos es un número de identificación único que se asigna a cada reservorio representado como una figura poligonal. Esta etiqueta única permite una identificación y referencia inequívoca de cada reservorio en la base de datos, facilitando la organización y el acceso a la información correspondiente.

■ Área de Polígono:

El atributo área de polígono está vinculado directamente a la superficie de cada reservorio, representada como un polígono. Esta área se expresa en metros cuadrados y hectáreas, y se calcula mediante procesos geoespaciales que consideran la geometría del polígono. Este proporciona información sobre el tamaño físico del reservorio y es esencial para la evaluación de su capacidad de almacenamiento y otras características relacionadas.

■ Capacidad de Volumen:

La capacidad de volumen se refiere al volumen total que puede ser contenido en el reservorio y se expresa en metros cúbicos. Aunque la superficie poligonal puede tener diferentes características topográficas y altitudes, el volumen total es un valor distribuido en todo el reservorio y se relaciona con una “capacidad total”.

■ Cotas de Elevación:

Las cotas de elevación se derivan del proceso que define las curvas de nivel utilizando el DEM disponible. Estas cotas se expresan en “msnm” y se refieren a la elevación del terreno en puntos específicos dentro del polígono del reservorio. Se calcula tanto una cota de elevación máxima como una cota de elevación mínima para caracterizar la variabilidad altimétrica del reservorio.

Es importante tener en cuenta que, para el cálculo de los siguientes tres parámetros, es necesario realizar un proceso iterativo que involucra al menos dos reservorios. No obstante, dado que este proceso se repite en varias ocasiones, en la base de datos

siempre se establecerán relaciones entre dos identificadores, que son “ID_Poligono Reservorio 1” e “ID_Poligono Reservorio 2”. Estos identificadores permiten vincular de manera precisa los reservorios que son objeto de análisis en cada iteración, así como su identificación geográfica y representación espacial.

Además, es relevante señalar que este mismo enfoque de relación de dos identificadores se aplica al cálculo de los parámetros para los reservorios existentes. En este caso particular, el primer identificador será el nombre de la central hidroeléctrica ya existente, mientras que el segundo identificador será “ID_Poligono Reservorio 2”. De esta manera, se establece una conexión unívoca en la base de datos que permite una asociación precisa entre las variables y los reservorios en consideración.

■ Distancia entre Reservorios:

La distancia entre reservorios se refiere a la separación espacial medida en metros entre los dos puntos centroides de los polígonos que representan a cada uno de los dos reservorios en cuestión. El cálculo de esta distancia implica un proceso dentro del entorno SIG que considera las coordenadas geográficas de los centroides respectivos. Esta medida proporciona información sobre la proximidad física entre los reservorios.

■ Salto entre Reservorios:

El salto entre reservorios es la diferencia altimétrica entre dos reservorios contiguos, es decir, entre el Reservorio 1 y el Reservorio 2. Esta diferencia se calcula teniendo en cuenta la cota de elevación mínima de cada reservorio..

■ Ratio entre Salto y Distancia:

El ratio entre salto y distancia es un resultado numérico que se obtiene al dividir el valor del salto (diferencia altimétrica) y la distancia espacial medida entre los dos reservorios (distancia entre centroides). Este cálculo se realiza directamente en la base de datos de Excel, utilizado por el equipo consultor. El resultado de este ratio proporciona información sobre la pendiente relativa entre los dos reservorios y su distancia física.

3.5 Discriminación de variables presentes en las bases de datos según los escenarios planteados

Es necesario señalar que existen diferencias entre las bases de datos de los reservorios nuevos y los existentes debido a sus contextos. En el caso de los reservorios nuevos, se consideran áreas que actualmente no desempeñan una función específica ni cuentan con la infraestructura necesaria para el desarrollo de la actividad que este estudio aborda. Por lo tanto, se hace una discriminación entre bases de datos respecto a datos como la proximidad a caminos existentes, la existencia de cuerpos de agua, proximidad a redes o subestaciones eléctricas, usos de suelo y/o áreas urbanas.

En contraste, la información que guía la ponderación de los reservorios existentes se enfoca en presas que ya han sido construidas y cuentan con una infraestructura mínima consolidada. Dado este enfoque, ciertos elementos que son relevantes en la evaluación de los reservorios nuevos pueden omitirse en el análisis de los existentes. A continuación, se detallan los elementos excluidos en la base de datos de reservorios existentes:

■ Distancia a ruta o camino más cercano

Este parámetro se refiere a la medida de la separación espacial entre un reservorio y la ruta o camino más cercano. El cálculo de esta distancia se expresa en metros y es esencial para evaluar la accesibilidad y la conectividad del reservorio con la infraestructura vial existente. Una distancia menor indica una mayor proximidad al acceso vial, lo que puede ser un factor determinante en la viabilidad y facilidad de operación del reservorio en relación con el transporte de recursos, personal y equipos.

■ Tipo de ruta o camino más cercano

Este atributo categoriza la ruta o camino más cercano al reservorio según la clasificación de OpenStreetMap. Los tipos incluyen “motorway”, “trunk”, “primary”, “secondary”, “tertiary”, “unclassified”, “construction”, “track” y “service”. Esta información proporciona una comprensión detallada de la naturaleza y el propósito de la infraestructura vial cercana, considerando una clasificación abierta internacional, lo que puede influir en la logística y la planificación asociadas al reservorio. Una mayor explicación se encuentra en la tabla 4.

■ Existencia de cuerpo de agua

Este parámetro se refiere a la presencia de un cuerpo de agua en las cercanías del reservorio. La categorización puede incluir “permanente”, “temporal” o “sin clasificación”, según la disponibilidad y la duración del cuerpo de agua. Además, se proporciona el nombre del cuerpo o curso de agua, lo que permite identificar las fuentes hídricas circundantes y su posible interacción con el reservorio.

■ Distancia a red eléctrica existente

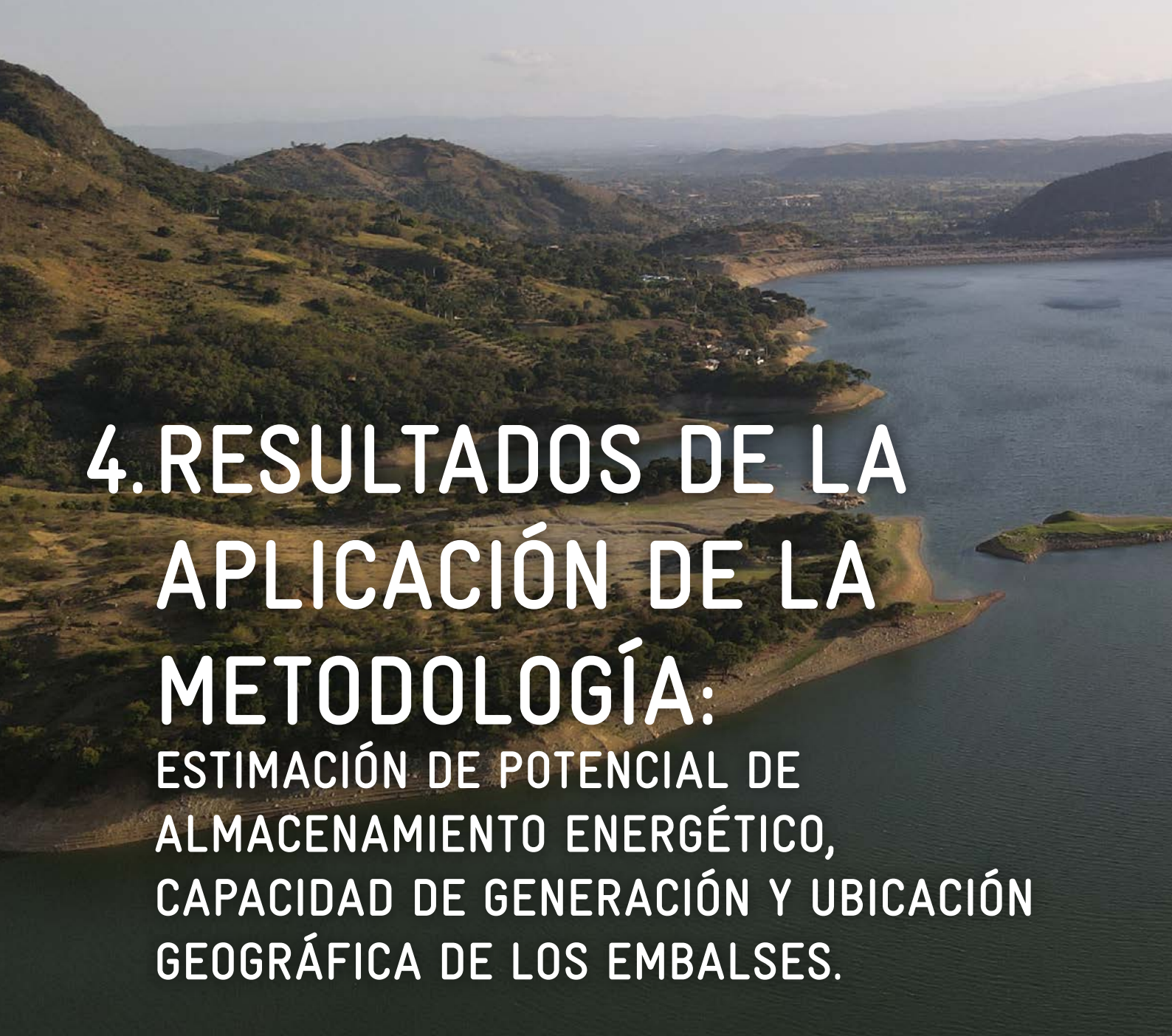
Este parámetro mide la distancia entre el reservorio y la red eléctrica existente. La distancia se expresa en metros y proporciona información sobre la cercanía del reservorio a la infraestructura eléctrica. El nombre de la red identifica la red eléctrica a la que se encuentra vinculado el reservorio.

■ Distancia a subestación existente

Este atributo mide la separación espacial entre el reservorio y la subestación eléctrica existente. La distancia se calcula en metros y proporciona información sobre la cercanía del reservorio a la infraestructura de subestación. El nombre de la subestación identifica específicamente la subestación a la que está asociado el reservorio.

■ Definición de uso de suelo

Este parámetro clasifica la zona en la que se ubica el reservorio en términos de uso de suelo. Especifica si el área es residencial, industrial o sin clasificación (que no es parte del área urbana).



4. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA: ESTIMACIÓN DE POTENCIAL DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO, CAPACIDAD DE GENERACIÓN Y UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS EMBALSES.

En este apartado se detallan los resultados de la aplicación de la metodología previamente detallada. Se sintetizan los principales resultados y sitios con mejor potencial en función del análisis multicriterio realizado. En la sección de los anexos se pueden encontrar tablas con los resultados en detalle.

4.1 Resultados de sitios

Tras aplicar la metodología desarrollada sobre las capas de información disponible, se llega a un total de 3,848 sitios posibles conformados por reservorios nuevos para una central de hidrobombeo, mientras que para el caso de centrales existentes que pudieran vincularse a otro reservorio el número fue de 1,261 sitios.

Tras aplicar el criterio de valor mínimo de ratio salto/distancia, estas opciones se reducen a 101 combinaciones para el caso de reservorios nuevos y 15 para el caso de reservorios asociables a centrales existentes⁴.

⁴ Para el caso de las centrales existentes se relajaron los criterios metodológicos, limitándolo a un ratio salto/distancia mayor o igual a 0.05 y una distancia máxima de 20 km.



4.2 Ponderaciones de puntajes de análisis multicriterio

4.2.1 Ponderaciones de puntajes

Para la asignación de puntajes a los sitios encontrados, se hace un tratamiento diferenciado entre los sitios con centrales existentes y los reservorios nuevos. En el caso de los reservorios nuevos se evalúan criterios adicionales como la distancia a la subestación, distancia a redes existentes y distancia a caminos. Cada criterio se pondera de manera diferenciada en función de su relevancia para la evaluación, lo que se resume en las siguientes tablas:

Tabla 7. Ponderadores reservorios nuevos.

Criterio	Ponderador	%
Salto [m]	10	25%
Superficie [m2]	4	10%
Volumen [m3]	4	10%
Distancia entre reservorios [m]	6	15%
Distancia/Salto	6	15%
Distancia subestación [m]	4	10%
Distancia a redes existentes [m]	2	5%
Distancia caminos [m]	2	5%
Nivel de riesgo de fallas geológicas	2	5%

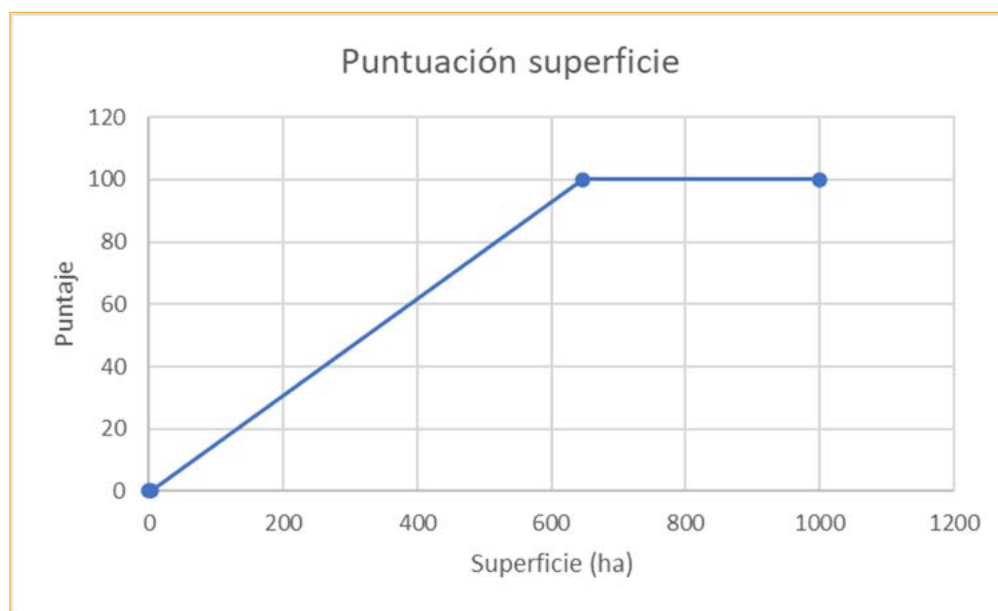
Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Ponderadores centrales existentes.

Criterio	Ponderador	%
Salto [m]	10	31.25%
Superficie [m2]	4	12.50%
Volumen [m3]	4	12.50%
Distancia entre reservorios [m]	6	18.75%
Salto/Distancia	6	18.75%
Nivel de riesgo falla geológica	2	6.25%

Fuente: Elaboración propia

Esta ponderación se aplica sobre una escala de 1 a 100 por medio de una función lineal simple basada en los valores máximos y mínimos encontrados en cada uno de los criterios. Dado que existen algunos valores outliers que distorsionan la función en algunas categorías evaluadas, para el valor máximo se utiliza el correspondiente a un determinado percentil que permita tener valores razonables en cada categoría. Por ejemplo, en casos como el volumen y la superficie, debido a la existencia de valores muy altos que distorsionan la función lineal, se toma como valor máximo el correspondiente a un percentil 85 %. Así, cualquier valor de volumen mayor al del percentil 85 % se le asigna 100 puntos. Un ejemplo de esta función lineal para el caso de la puntuación de la superficie se puede ver en la siguiente figura.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Función de puntaje para ponderación de criterio de superficie.

Tras la ponderación de los puntajes obtenidos por cada combinación de sitios para cada categoría, se llega a un puntaje ponderado.

4.2.2 Normalización de puntajes ponderados

Dado que los puntajes obtenidos en el proceso de ponderación no son homogéneos en cuanto a su distribución ya que, por ejemplo, en el caso de los reservorios nuevos el valor máximo es 75 puntos y el mínimo 24, resulta difícil de diferenciar cuáles son los reservorios con mayor potencial solo viendo dicho puntaje. Por ello, se realiza un proceso de normalización que permite asignar los reservorios a 5 niveles distintos de potencial en función de su puntaje ponderado. Este proceso de normalización consiste en ajustar los puntajes ponderados en una distribución de valores que van de 0 a 100 donde 0 corresponde al mínimo (24 puntos ponderados) y 100 al máximo (75 puntos ponderados). Esto se realiza de manera separada tanto para las combinaciones entre reservorios nuevos como para las asociaciones de reservorios a centrales existentes. Por lo mismo, es importante destacar que los valores de los puntajes obtenidos de manera previa a la normalización son mejores indicadores del potencial de cada sitio ya que tras la normalización existen reservorios con puntaje 100 que no son evaluados de manera perfecta en todos los criterios revisados en el punto anterior. En este mismo sentido, debido a que en el caso de los reservorios existentes se relajaron los criterios metodológicos para ratio salto/distancia y distancia máxima, el resultado ponderado debe ser analizado con precaución y dentro de su contexto.

En el caso de los reservorios nuevos, tras la normalización, la asignación resultante se presenta a continuación, donde se muestra la cantidad de sitios encontrados para reservorios nuevos según categorías normalizadas.

Tabla 9. Clasificación de los resultados normalizados para reservorios nuevos

Nivel	Evaluación normalizada	Sitios encontrados
Potencial alto	81 – 100	4
Potencial medio-alto	61 – 80	19
Potencial medio	41 – 60	45
Bajo Potencial	21 – 40	27
Sin Potencial	0 – 20	6
Total		101

Para el caso de los reservorios con centrales existentes, los puntajes mínimo y máximo previos a la normalización fueron de 24 y 79, respectivamente. Tras la normalización, la asignación resultante se presenta a continuación, donde se muestra la cantidad de sitios encontrados para centrales existentes según categorías normalizadas.

Tabla 10. Clasificación de los resultados normalizados para centrales existentesnuevos

Nivel	Evaluación normalizada	Sitios encontrados
Potencial alto	81 – 100	3
Potencial medio-alto	61 – 80	2
Potencial medio	41 – 60	5
Bajo Potencial	21 – 40	3
Sin Potencial	0 – 20	2
Total		15

4.3 Aplicación de metodología de costeo

Una vez que se identifican los sitios potenciales y se evalúa su potencial, se aplica un proceso de costeo aproximado que sirve como un proxy del costo de inversión en cada uno de los sitios. El costo de inversión se divide en 3 componentes principales las cuales se obtienen del informe “Desarrollo de metodología aplicada en sistemas de información geográfica para identificar potencial de centrales de bombeo con agua de mar en Chile” de GIZ et al. (2020).

- Costo de obra de reservorio: se calcula un costo aproximado de 40.33 USD por m² de superficie de reservorio, basado en una presa tipo referencial.
- Costo de túnel: representa el costo del túnel de conexión entre ambos reservorios. Se basa en la potencia, salto y distancia entre reservorios. La potencia se calcula utilizando la ecuación de energía, detallada en 2.3.2, y una capacidad de almacenamiento de 18 horas. La ecuación de cálculo se detalla a continuación:

$$\text{Costo de túnel (MM USD)} = (17 + 0.66P) + L(210 + 1.28P) H^{-0.54}$$

- Costo de casa de máquinas: Costos de las obras civiles, equipos mecánicos y eléctricos necesarios, incluida la subestación local. Se calcula según la siguiente ecuación:

$$\text{Costo casa de máquinas (MM USD)} = 63.5 H^{-0.5} P^{-0.54}$$

Por último, los costos agregados se dividen en la potencia estimada de la central (calculada en función de la energía del reservorio y 18 horas de almacenamiento) para obtener un costo de inversión por MW.

Tal como se observa en la siguiente sección, los sitios calificados como “potencial alto” presentan un rango de costo total estimado desde USD 3,700/kW a USD 5,112/kW, en el caso de los 4 sitios de reservorios nuevos propuestos, y un rango de costo total estimado desde USD 1,896/kW a USD 2,403/kW, en el caso de los 3 sitios prioritarios de reservorios existentes. Las centrales de bombeo propuestas en los cuatro sitios prioritarios de reservorios nuevos tienen una potencia sugerida de 27 MW, 39 MW, 77 MW y 88 MW, sumando un total de 231 MW de potencia estimada nueva que se propone instalar de centrales de bombeo con calificación de potencial alto. Por su parte, las centrales de bombeo propuestas en los tres sitios prioritarios de reservorios

existentes tienen una potencia sugerida de 125 MW, 206 MW y 433 MW, sumando un total de 639 MW de potencia estimada (dado que las primeras dos potencias corresponden a diferentes combinaciones de la presa Sabaneta) que se propone instalar de centrales de bombeo con calificación de potencial alto.

4.4 Análisis de mejores sitios encontrados

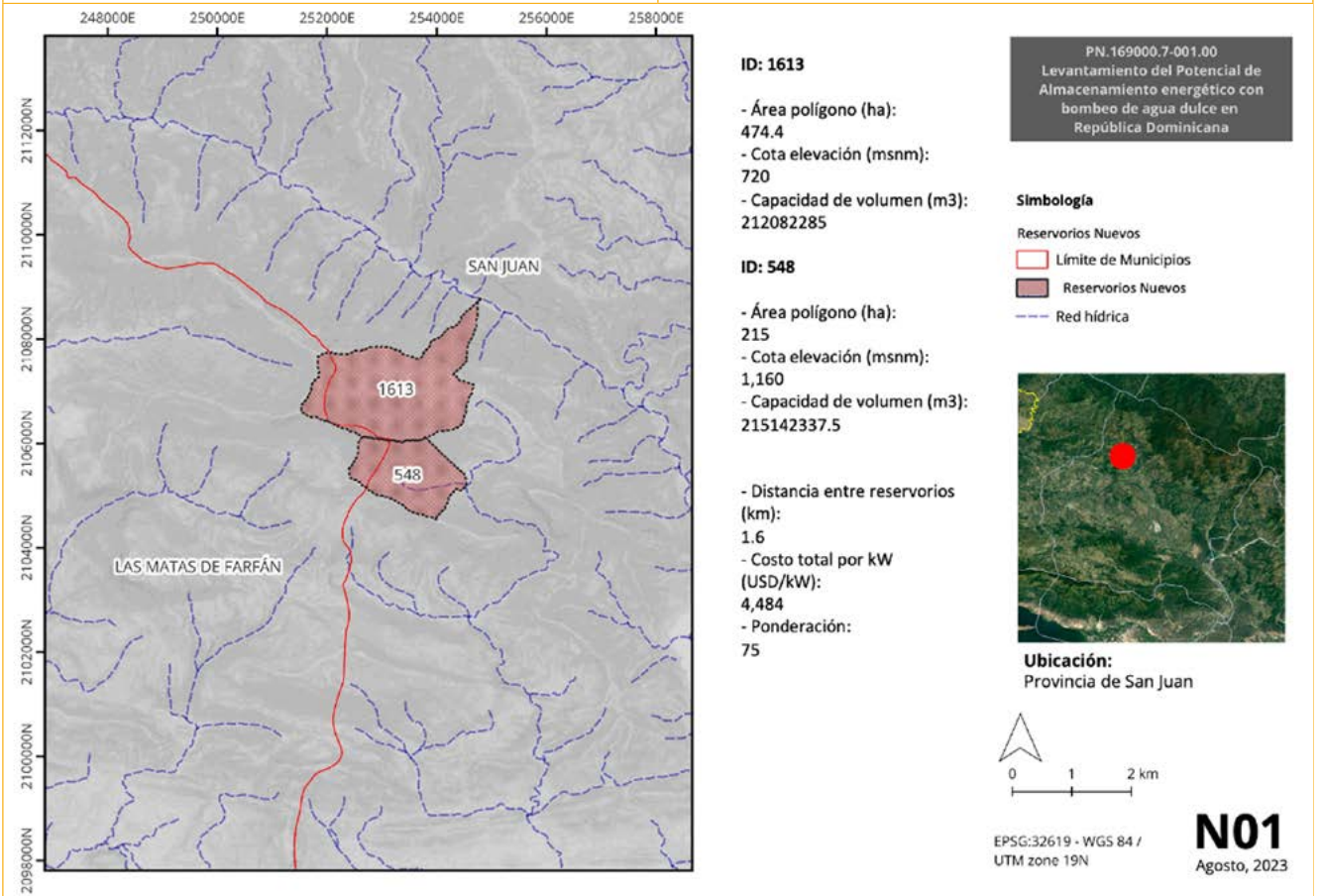
Debido a su mayor potencial, se decide mostrar más en detalle los sitios encontrados con el mejor puntaje, tanto para el caso de los reservorios nuevos, como con los de reservorios nuevos asociados con centrales existentes. Para estos se muestra su ubicación, sus valores encontrados en los criterios utilizados, y su puntaje previo a la normalización, con el fin de representar más fidedignamente su potencial.

Dentro de las tablas se caracterizan aspectos técnicos de los sitios, provenientes de la información disponible para cada uno. En base a estos datos, se calculan valores estimados de energía, utilizando la fórmula del numeral 2.3.2. En base a esta fórmula, se asume un tiempo de almacenamiento de 18 horas para los sitios basados en nuevos reservorios, y con esto se llega a la potencia estimada.

En el caso de los sitios con centrales existentes, se tomó la potencia instalada de esta central para los casos en que esta estuviera disponible. En base a la energía estimada del reservorio nuevo asociado se asigna una cantidad de horas de almacenamiento potencial que podría ofrecer esta central manteniendo su potencia y con el volumen de agua del reservorio superior asociado.

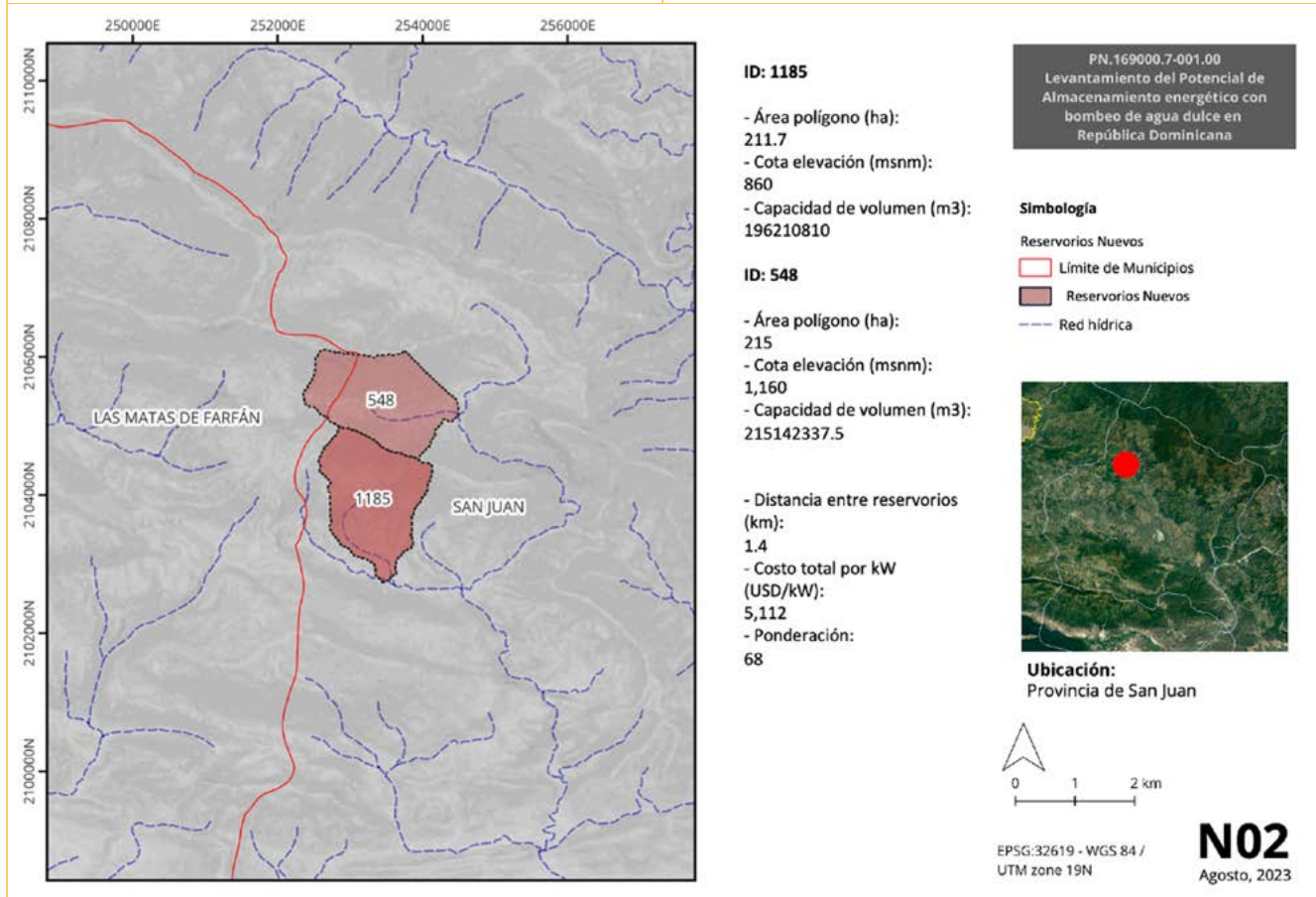
4.4.1 Reservorios nuevos

ID Reservorio	1613-548
Puntaje Ponderado Evaluación	75
Salto (m)	440
Distancia entre Reservorios (m)	1,655
Volumen Reservorio Superior (m³)	215 millones
Superficie Reservorio Superior (ha)	215
Volumen Reservorio Inferior(m³)	212 millones
Superficie Reservorio Inferior (ha)	474
Energía disponible (GJ)*	710
Potencia Estimada (MW)*	39
Costo por kW aproximado (\$/kW)*	4,484
Imagen Satelital	∞



* Valor teórico

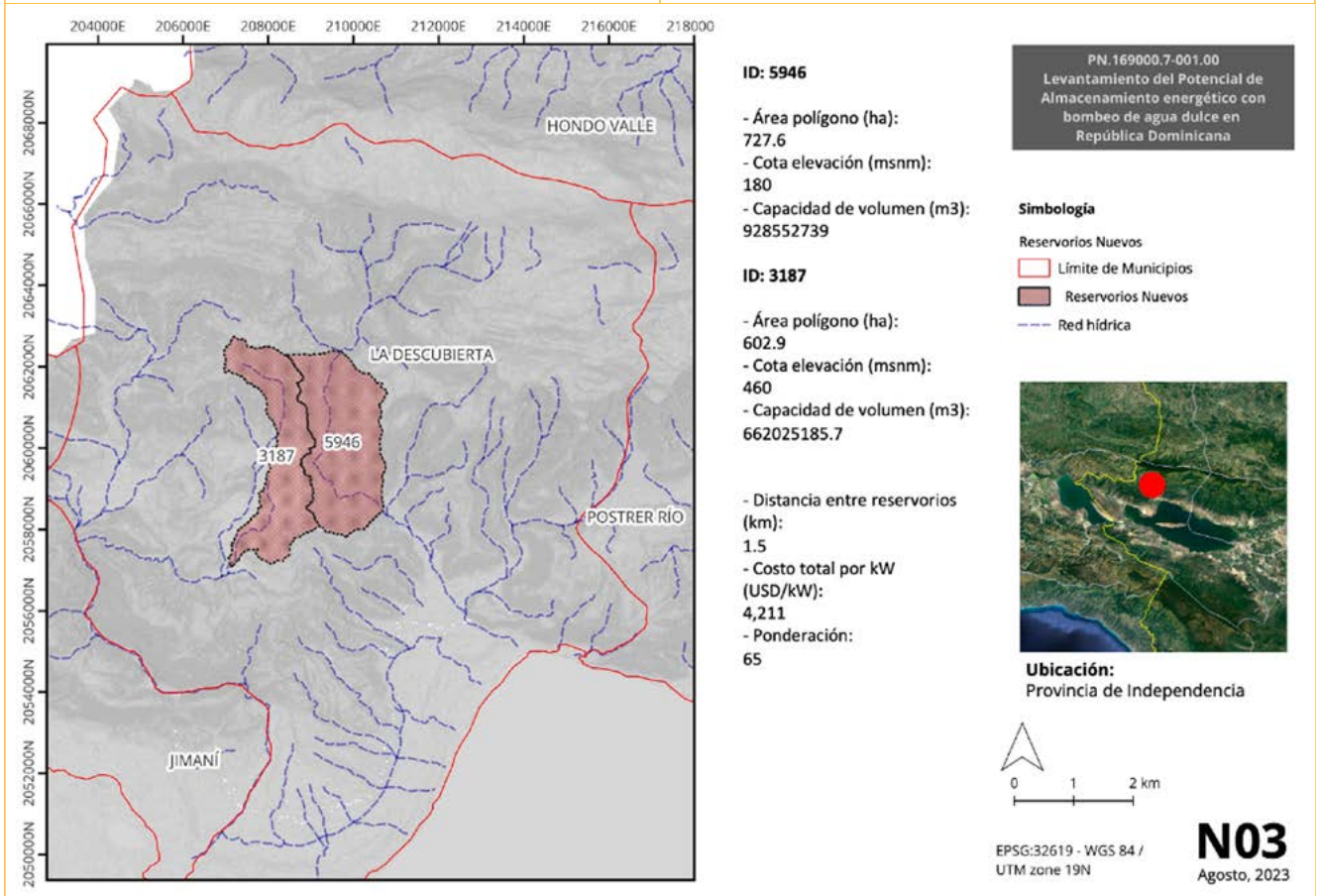
ID Reservoirio	1185-548
Puntaje Ponderado Evaluación	68
Salto (m)	300
Distancia entre Reservoirios (m)	1,431
Volumen Reservoirio Superior (m³)	215 millones
Superficie Reservoirio Superior (ha)	215
Volumen Reservoirio Inferior(m³)	196 millones
Superficie Reservoirio Inferior (ha)	211
Energía disponible (GJ)*	484
Potencia Estimada (MW)* ⁵	27
Costo por kW aproximado (\$/kW)*	5,112
Imagen Satelital	∞



* Valor teórico

5 Para alcanzar 18 horas totales de almacenamiento

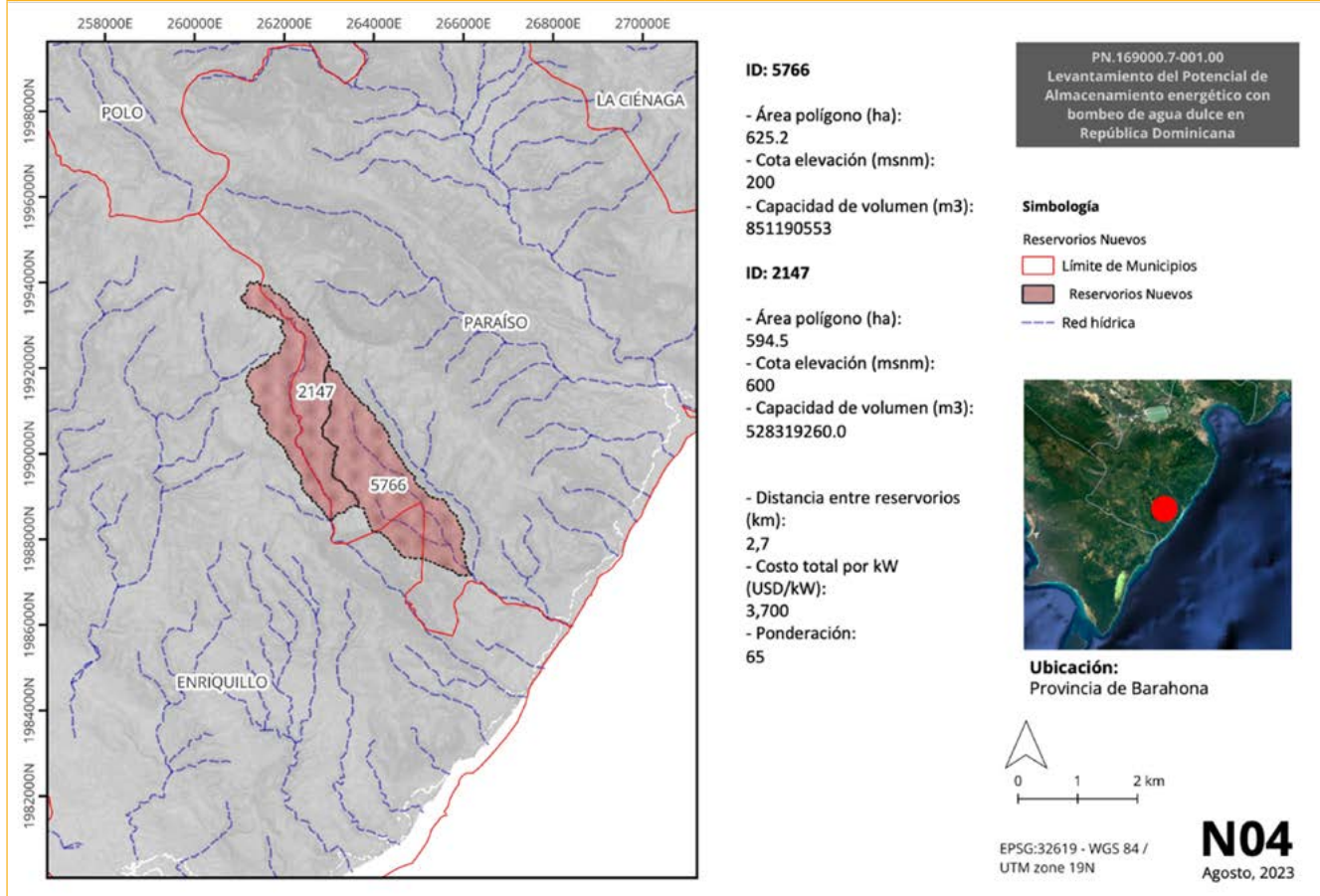
ID Reservoirio	5946-3187
Puntaje Ponderado Evaluación	65
Salto (m)	280
Distancia entre Reservoirios (m)	1,574
Volumen Reservoirio Superior (m³)	928 millones
Superficie Reservoirio Superior (ha)	728
Volumen Reservoirio Inferior(m³)	662 millones
Superficie Reservoirio Inferior (ha)	603
Energía disponible (GJ)*	1,391
Potencia Estimada (MW)* ⁶	77
Costo por kW aproximado (\$/kW)*	4,211
Imagen Satelital	∞



* Valor teórico

6 Para alcanzar 18 horas totales de almacenamiento

ID Reservoirio	5766-2147
Puntaje Ponderado Evaluación	65
Salto (m)	400
Distancia entre Reservoirios (m)	2,793
Volumen Reservoirio Superior (m ³)	528 millones
Superficie Reservoirio Superior (ha)	595
Volumen Reservoirio Inferior(m ³)	851 millones
Superficie Reservoirio Inferior (ha)	625
Energía disponible (GJ)*	1,586
Potencia Estimada (MW)* ⁷	88
Costo por kW aproximado (\$/kW)*	3,700
Imagen Satelital	∞

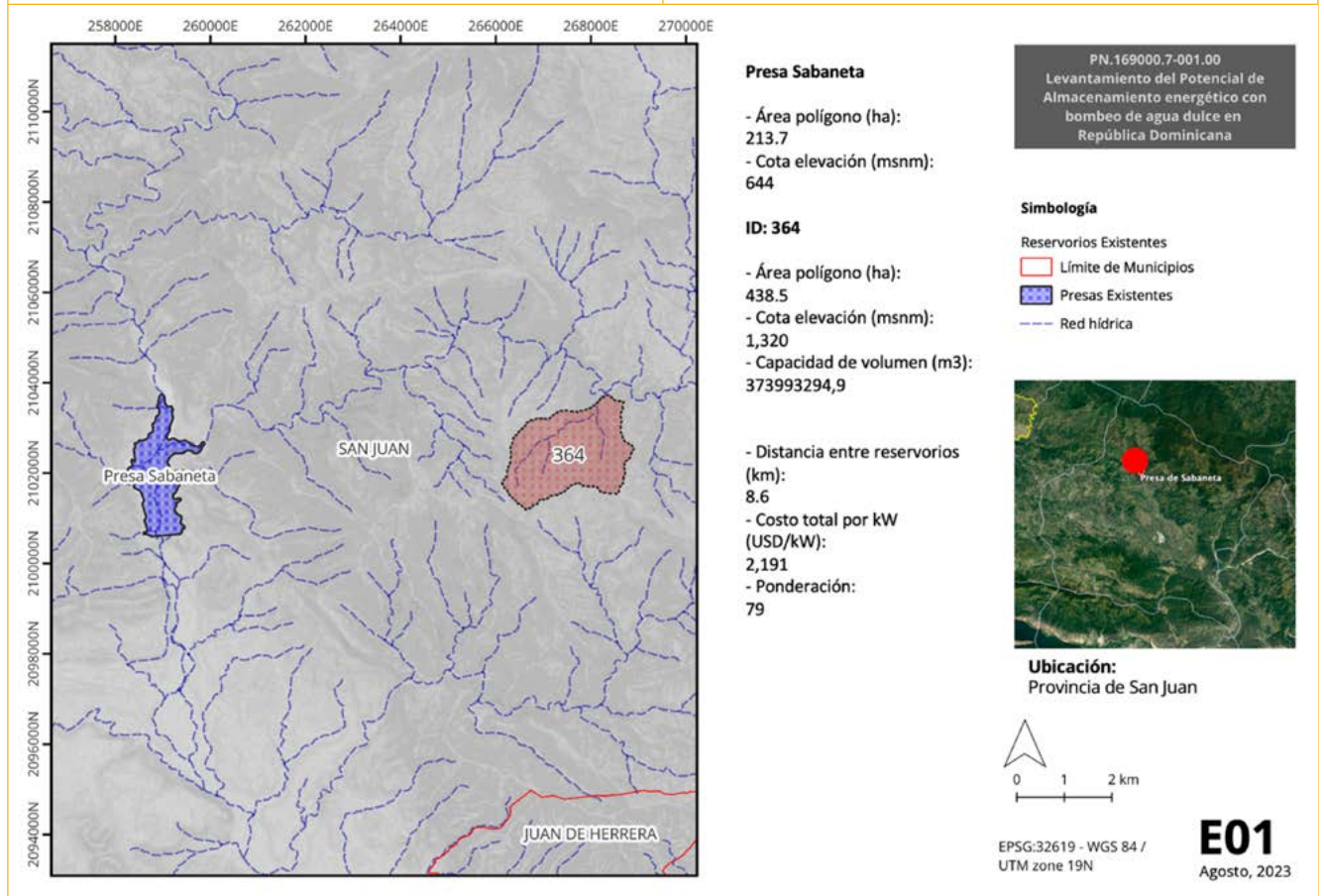


* Valor teórico

⁷ Para alcanzar 18 horas totales de almacenamiento

4.4.2 Sitios asociados a centrales existentes

Nombre Central Existente	Sabaneta
ID Reservoirio superior	364
Puntaje Ponderado Evaluación	79
Salto (m)	676
Distancia entre Reservoirios (m)	8,615
Volumen Reservoirio Superior (m ³)	374 millones
Superficie Reservoirio Superior (ha)	439
Volumen Presa (m ³)	-
Superficie Presa (ha)	214
Energía disponible (GJ)*	3,705
Potencia central (MW)**	206
Horas Almacenamiento*	18
Costo por kW aproximado (\$/kW)**	2,191
Tipo de Turbina	Francis
Tipo de Central	IV
Imagen Satelital	∞

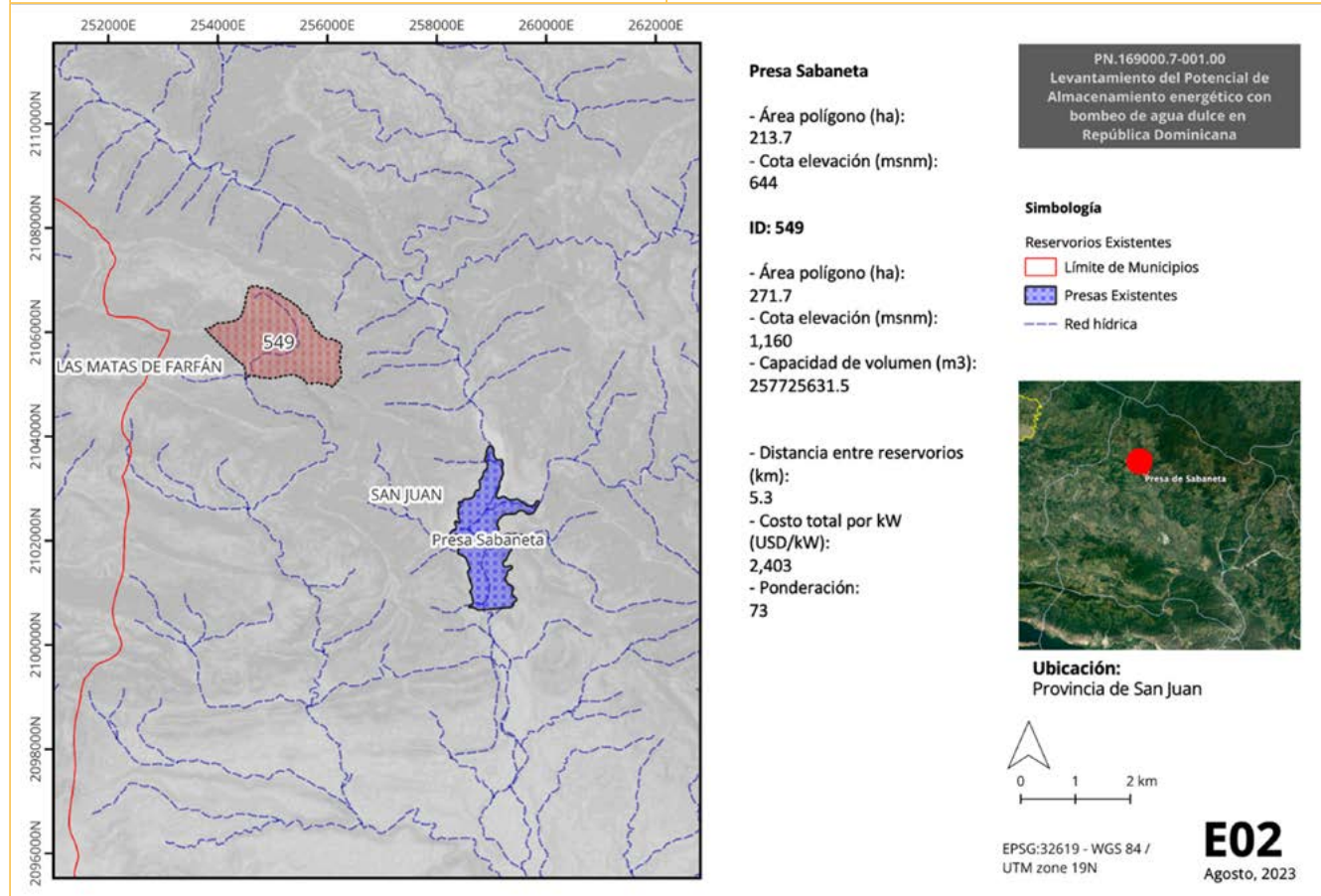


* Valor teórico

** Valor teórico de incorporar un sistema de bombeo hacia el reservoirio superior aprovechando infraestructura existente

*** Valor teórico. Potencia actual instalada de 6.35 MW

Nombre Central Existente	Sabaneta
ID Reservorio superior	549
Puntaje Ponderado Evaluación	73
Salto (m)	516
Distancia entre Reservorios (m)	5,389
Volumen Reservorio Superior (m³)	258 millones
Superficie Reservorio Superior (ha)	272
Volumen Presa (m³)	-
Superficie Presa (ha)	214
Energía disponible (GJ)*	2,244
Potencia central (MW)***	125
Horas Almacenamiento*	18
Costo por kW aproximado (\$/kW)**	2,403
Tipo de Turbina	Francis
Tipo de Central	IV
Imagen Satelital	∞

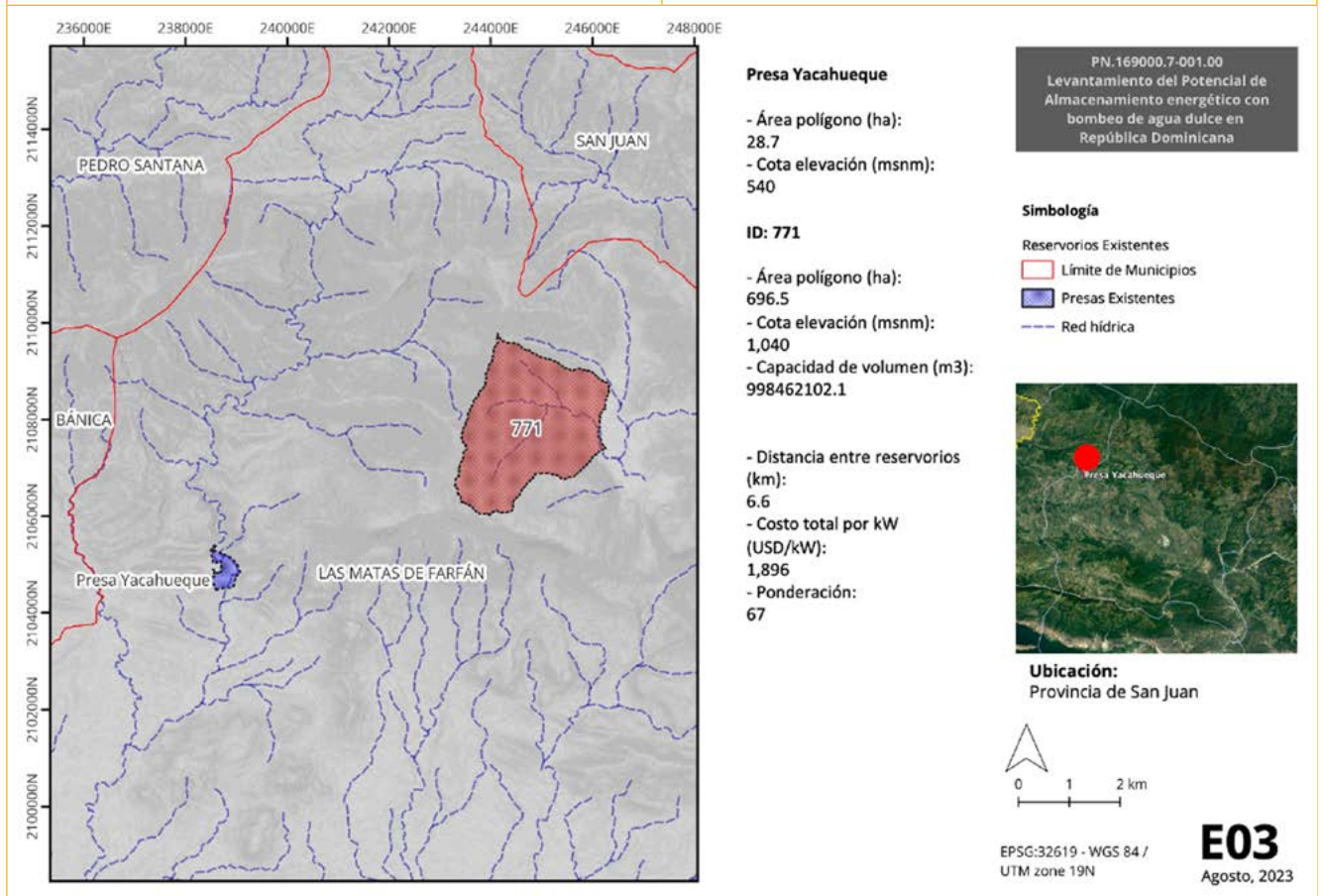


* Valor teórico

** Valor teórico de incorporar un sistema de bombeo hacia el reservorio superior aprovechando infraestructura existente

*** Valor teórico. Potencia actual instalada de 6.35 MW

Nombre Central Existente	Yacahueque
ID Reservorio superior	771
Puntaje Ponderado Evaluación	67
Salto (m)	500
Distancia entre Reservorios (m)	6661
Volumen Reservorio Superior (m ³)	998 millones
Superficie Reservorio Superior (ha)	697
Volumen Presa (m ³)	-
Superficie Presa (ha)	28
Energía disponible (GJ)*	7793
Potencia central (MW)*	433 ⁸
Horas Almacenamiento*	18
Costo por kW aproximado (\$/kW)**	1,896
Tipo de Turbina	No disponible
Tipo de Central	No disponible
Imagen Satelital	∞



* Valor teórico

** Valor teórico de incorporar un sistema de bombeo hacia el reservorio superior aprovechando infraestructura existente

8 Esta central actualmente es utilizada solo para riego. Se calcula un valor teórico en base a 18 horas de almacenamiento de igual manera que en las centrales nuevas.



5. RESERVORIOS POTENCIALES CATASTRADOS PREVIAMENTE

A modo de complementar información técnica para posibles estudios posteriores, a continuación se indican los principales proyectos de hidrobombeo identificados en otros análisis desarrollados previamente en estudios indicativos de prospección realizados para EGEHID, los cuales no necesariamente consideraron las mismas restricciones que este estudio:

Tabla 11. Principales proyectos de hidrobombeo

Proyecto	Ubicación	Estado Actual	Comentarios generales
Proyecto de Acumulación por Bombeo Camú (Guaigüi)	La Vega	Estudio Lahmeyer	-
Proyecto de Hidrobombeo Sabana Yegua	Azua	Idea	-
Proyecto de Acumulación por Bombeo Nigua	San Cristóbal	Estudio Lahmeyer	-
Proyecto de Hidrobombeo Sabaneta	San Juan	Idea	No se encontró información que permita la ubicación geográfica propuesta del proyecto para realizar comentarios
Proyecto de Hidrobombeo El Cajulito	Elías Piña	Idea	-
Proyecto de Hidrobombeo Los Mesas	Elías Piña	Idea	-
Proyecto de Hidrobombeo Jaguey	Monseñor Nouel	Estudio Lahmeyer	No se encontró información que permita la ubicación geográfica propuesta del proyecto para realizar comentarios

Fuente: Elaboración propia en base de información proporcionada por EGEHID

5.1 Proyecto de acumulación por bombeo Camú

El proyecto denominado “Acumulación por bombeo Camú” se encuentra en el municipio Jarabacoa, aproximadamente a 4 km del límite de su expansión urbana.

Para efectos de este estudio, el área donde se emplaza el proyecto no fue considerada ya que el reservorio potencial se encuentra inserta en un área de protección y restricción dentro de la categoría “Paisaje protegido-área nacional de recreo” según la Ley 202-04.

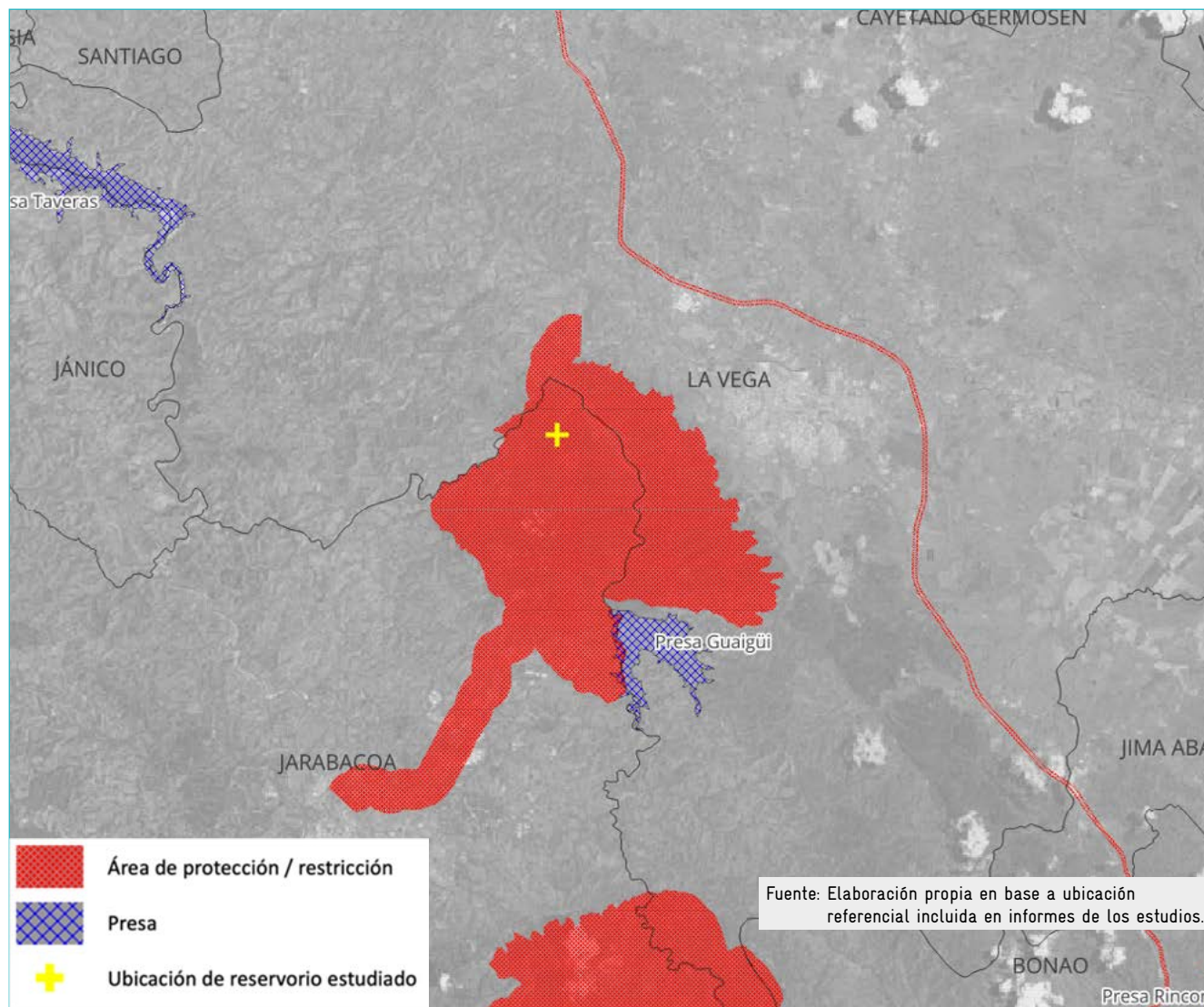


Figura 12. Imagen de ubicación referencial del proyecto Camú (en rojo áreas de protección y/o restricción)

5.2 Proyecto de hidrobombeo Sabana Yegua

El proyecto de hidrobombeo Sabana Yegua se encuentra en el municipio de San Juan, junto a la presa Sabana Yegua.

Para efectos de este estudio, el área donde se emplaza el proyecto no fue considerada ya que el reservorio potencial se encuentra inserta en un área de protección y restricción dentro de la categoría “Reserva natural-Reserva Forestal” según la Ley 202-04.

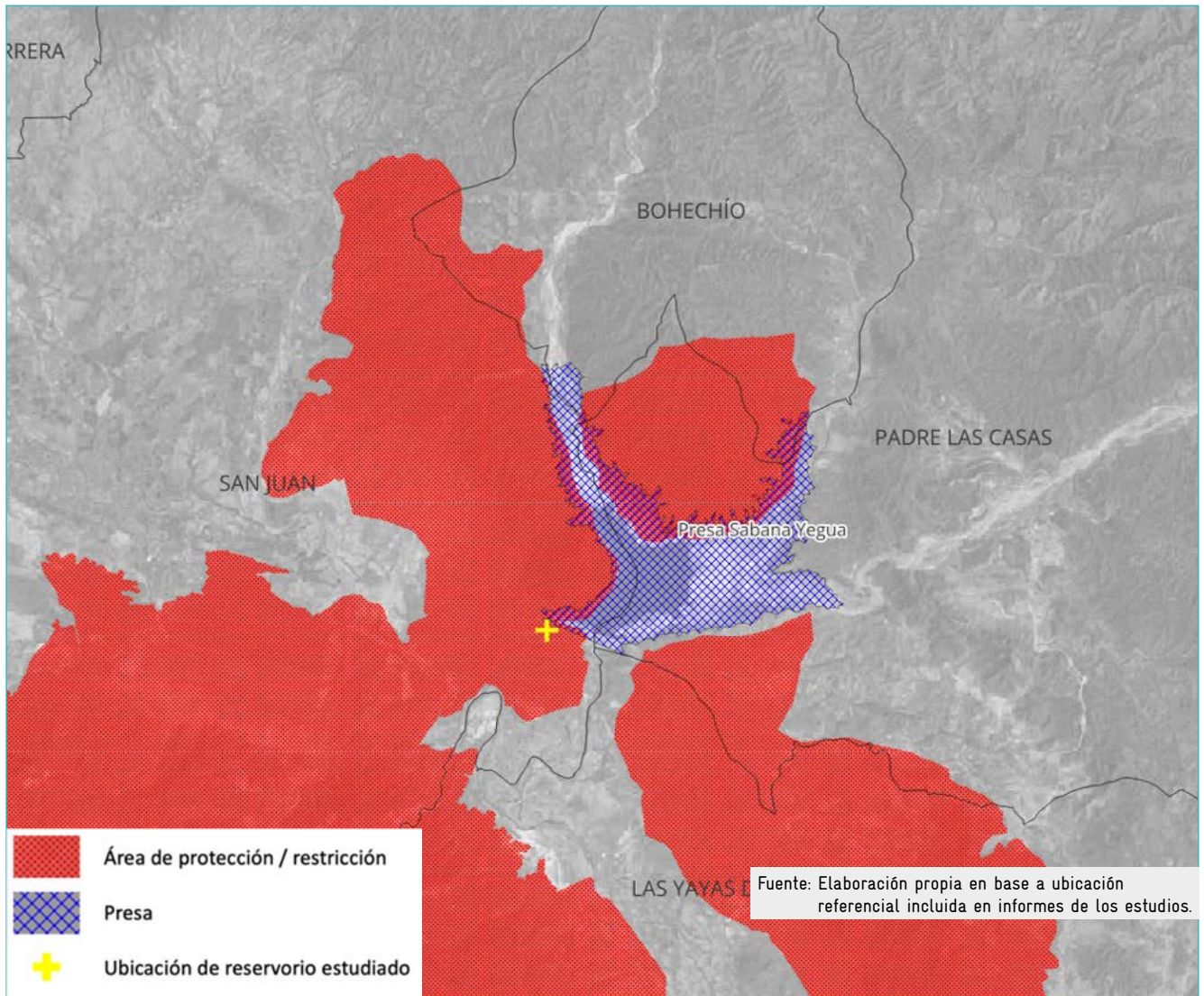


Figura 13. Imagen de ubicación referencial del proyecto Sabana Yegua (en rojo áreas de protección y/o restricción)

Distancia entre la presa existente y reservorio ID 7714: Todos los valores catastrados se encuentran fuera del rango considerado para su evaluación técnica. Para este caso los valores oscilaron entre 11,317m ~ 24,449m, mientras que el rango de evaluación fue 271m ~ 5,094m.

Salto entre presa existente y reservorio ID 7714: El salto entre el reservorio y las presas Valdesia (50.0m), Aguacate (229.0m) y Jigüey (441.5m) se encuentran dentro del rango considerado para la evaluación (rango entre 40 ~ 640m). Sin embargo, Presa Las Barías se encuentra por debajo del rango de evaluación, con 22.5m

Ratio Salto / Distancia: Los valores registrados entre salto y distancia para todas las presas evaluadas se encontraron por debajo del rango mínimo de evaluación (rangos entre 0.05 ~ 0.11). Respecto a esto último, aquellas más cercanas al mínimo admitido fueron las Presas Aguacate (ratio 0.015) y Presa Jigüey (ratio 0.018).

Tabla 12. Características de presas existentes conectadas al reservorio ID 7714

Presa	ID_Reservorio	Distancia entre Presa y Reservorio (m)	Salto entre Presa y Reservorio (m)	Ratio Salto/ distancia	Zona de inundación	Fallas geológicas
Presa Valdesia	7714	11,317	50.0	0.004	No	Fallas diaclasas. Mayor Riesgo
Presa Las Barías		16,158	22.5	0.001		
Presa Aguacate		15,283	229.0	0.015		
Presa Jigüey		24,449	441.5	0.018		

Fuente: Elaboración propia

5.4 Proyecto de hidrobombeo Cajulito

El proyecto de hidrobombeo El Cajulito se encuentra en el municipio de Bánica.

Este reservorio se encuentra en la base de datos asignada con el ID 4052. Se midió en relación con las 3 presas más cercanas (Sabaneta, Yacahueque y Palma Sola), donde algunos de estos valores se encuentran fuera de los rangos críticos que se fijaron para realizar la evaluación.

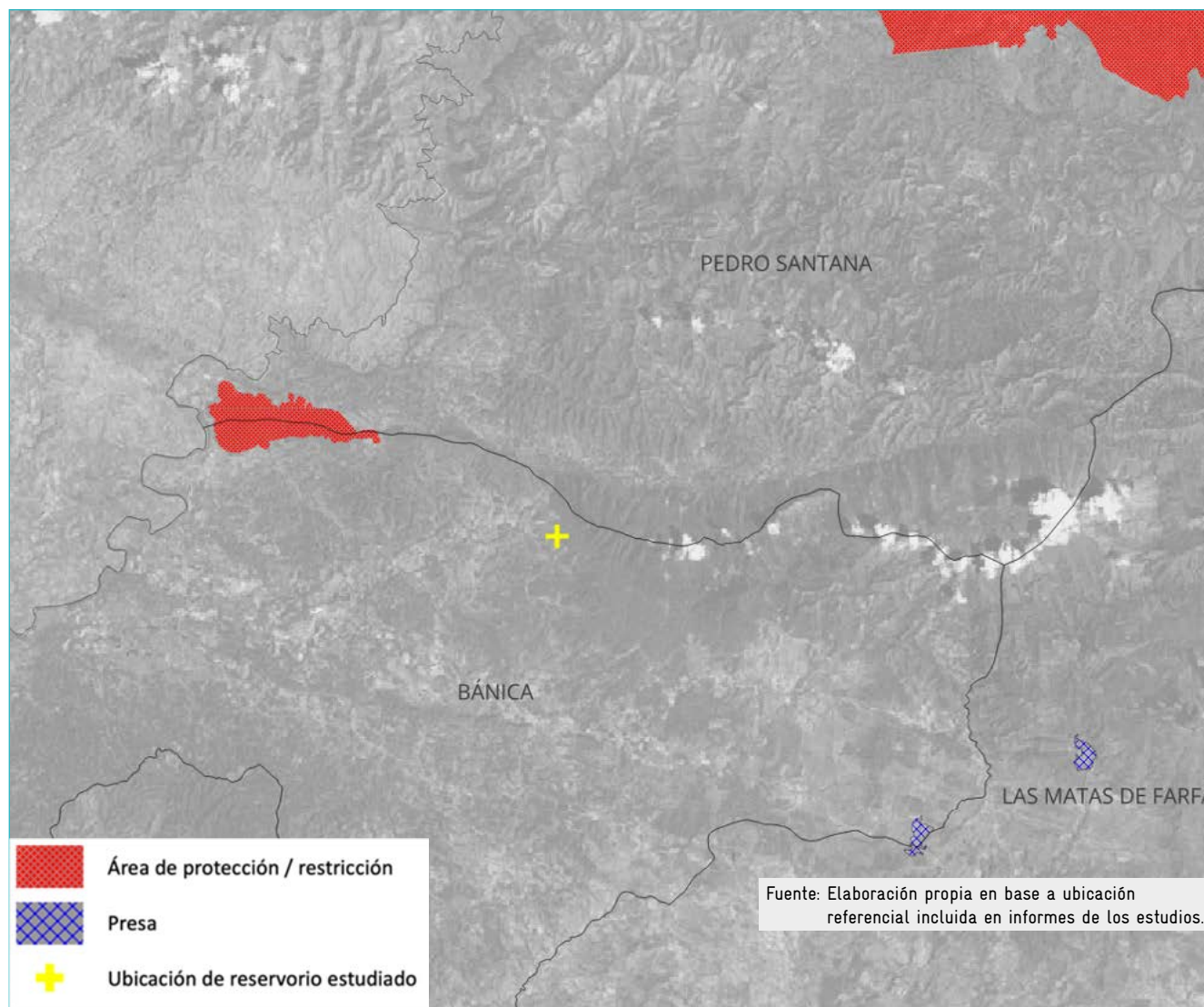


Figura 15. Imagen de ubicación referencial del proyecto Cajulito (en rojo áreas de protección y/o restricción)

Distancia entre la presa existente y reservorio ID 4052: Todos los valores catastrados se encuentran fuera del rango considerado para su evaluación técnica. Para este caso los valores oscilaron entre 34,332m ~ 11,506m, mientras que el rango de evaluación fue 271m ~ 5,094m.

Salto entre presa existente y reservorio ID 4052: El salto en todas las presas analizadas se encuentran dentro del rango de evaluación.

Ratio Salto / Distancia: Los valores registrados entre salto y distancia para todas las presas evaluadas se encontraron por debajo del rango mínimo de evaluación (rangos de evaluación entre 0.05 ~ 0.11). Si bien las presas analizadas mantienen un rango admisible de salto, la distancia existente entre la presa existente y el reservorio estudiado es crítico. Con esto se obtienen como resultado ratios entre 0.008 y 0.010, por debajo del rango establecido para la evaluación.

Tabla 13. Características de presas existentes conectadas al reservorio ID 4052

Presa	ID_Reservorio	Distancia entre Presa y Reservorio (m)	Salto entre Presa y Reservorio (m)	Ratio Salto/ distancia	Zona de inundación	Fallas geológicas
Presa Sabaneta	4052	34,332	284.0	0.008	No	No
Presa Yacahueque		14,153	180.0	0.012		
Presa Palma Sola		11,506	120.0	0.010		

Fuente: Elaboración propia

5.5 Proyecto de hidrobombeo Los Mesas

El proyecto de hidrobombeo Los Mesas se encuentra en el municipio Juan Santiago.

Este reservorio se encuentra en la base de datos asignada con el ID 2244. Se midió en relación con las 4 presas más cercanas (Sabaneta, Yacahueque, Dos Bocas y Palma Sola), donde algunos de estos valores se encuentran fuera de los rangos críticos que se fijaron para realizar la evaluación.

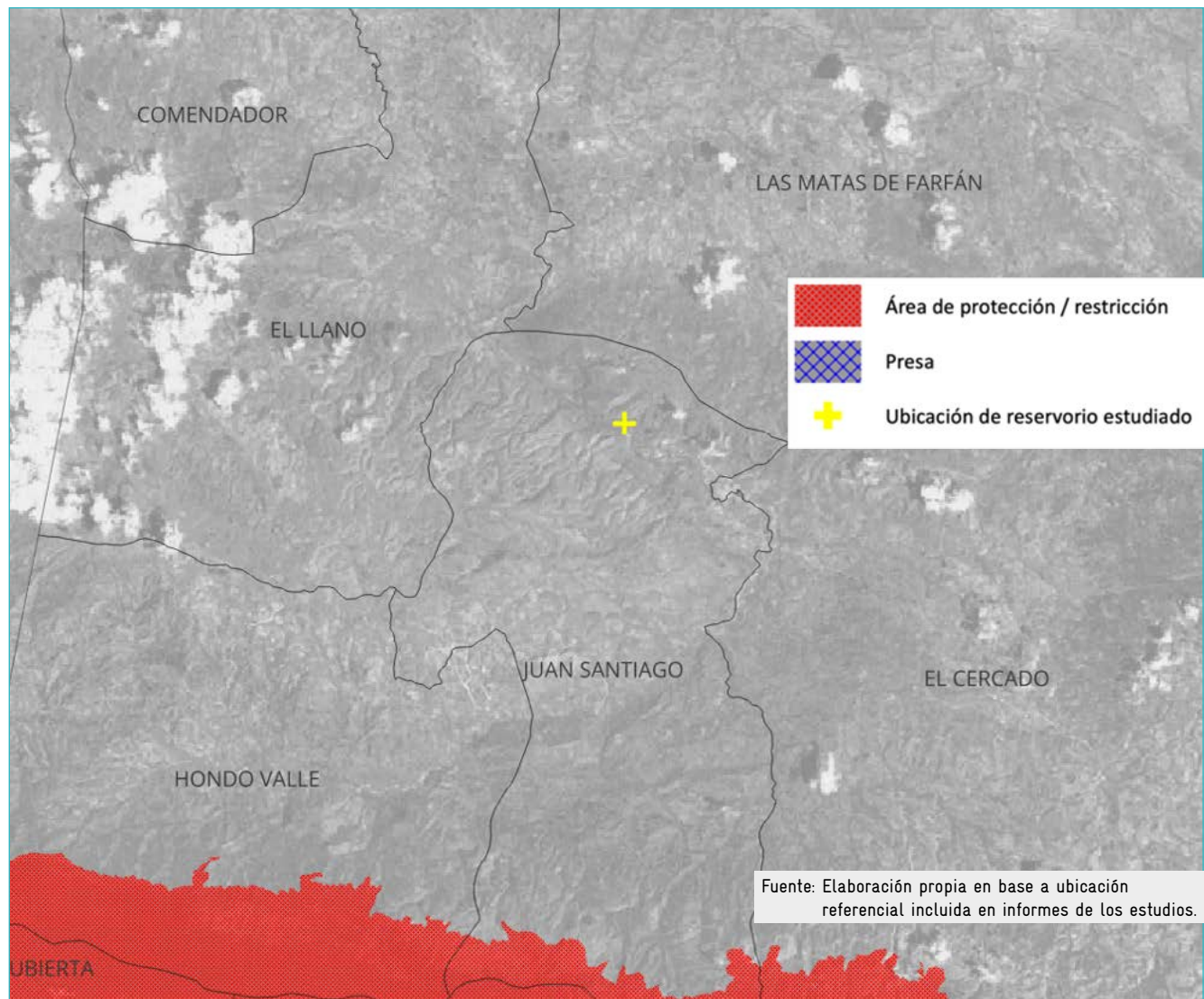


Figura 16. Imagen de ubicación referencial del proyecto Los Mesas (en rojo áreas de protección y/o restricción)

Distancia entre la presa existente y reservorio ID 2244:

Todos los valores catastrados se encuentran fuera del rango considerado para su evaluación técnica, registrando las mayores distancias a presas existentes. Para este caso los valores oscilaron entre 22,363m ~ 40,018m, mientras que el rango de evaluación fue 271m ~ 5,094m.

Salto entre presa existente y reservorio ID 2244: El salto entre el reservorio y las presas Sabaneta (104m), Dos Bocas (340m) y Palma Sola (60m), se encuentran dentro del rango considerado

para la evaluación (rango entre 40 ~ 640m). Por otro lado, con los datos disponibles no se registró diferencia de altitud entre la presa y el reservorio.

Ratio Salto / Distancia: Los valores registrados entre salto y distancia para todas las presas evaluadas se encontraron por debajo del rango mínimo de evaluación (rangos de evaluación entre 0.05 ~ 0.11). El no cumplimiento del rango de ratio se debió a la gran distancia existente entre la presa y el reservorio ID 2244.

Tabla 14. Características de presas existentes conectadas al reservorio ID 2244

Presa	ID_Reservorio	Distancia entre Presa y Reservorio (m)	Salto entre Presa y Reservorio (m)	Ratio Salto/ distancia	Zona de inundación	Fallas geológicas
Presa Sabaneta	2244	40,018	104.0	0.002	No	No
Presa Yacahueque		28,733	0.0	0.000		
Presa Dos Bocas		22,363	340.0	0.015		
Presa Palma Sola		25,175	60.0	0.002		

Fuente: Elaboración propia



6. COMENTARIOS FINALES Y RECOMENDACIONES PARA PRÓXIMOS PASOS

6.1 Respecto a los reservorios encontrados

En una primera etapa el geoproceso en SIG tuvo como resultado la definición de 10,542 polígonos definidos como reservorios base, cuya principal característica es actuar como una micro-cuenca, conectada a la red hídrica (la cual puede tener categoría de “permanente”, “temporal” o “nulo”). Posteriormente con el filtro inicial de “áreas de protección y restricción” se calcularon 6,532 polígonos, definidos como reservorios base.

El estudio consideró dos escenarios, uno vinculado con el estudio y catastro de reservorios nuevos y otro respecto a reservorios existentes. En ambos casos, y tras la aplicación de una serie de filtros iniciales, se construyó una base de datos de 1,261

polígonos para los reservorios existentes y 3,848 polígonos para los reservorios nuevos.

Para el caso de los reservorios existentes, el estudio se enfocó en 15 áreas que actualmente ya funcionan conectadas a una presa. El análisis de este escenario resultó ser más restrictivo, fundamentalmente por las cotas de operación de las presas en relación con los potenciales reservorios y la proximidad entre ambas áreas. En este escenario el principal desafío es la adaptación técnica de las presas existentes con reservorios potenciales, más aún, cuando existen áreas residenciales no consolidadas alrededor a estos reservorios o, por otro lado, las condiciones geográficas naturales del país que no permiten un desarrollo óptimo para reservorios existentes.



En el caso de los reservorios nuevos, al explorar de manera hipotética las áreas de ubicación más prometedoras, se lograron catalogar 101 combinaciones viables que se encontraban dentro de rangos aceptables. No obstante, la validación de estas combinaciones está directamente relacionada con la capacidad de inversión en los nuevos repertorios identificados, considerando aspectos logísticos, de producción, técnicos y otros.

El estudio adoptó una perspectiva rigurosa al tener en cuenta parámetros óptimos derivados de la literatura científica. En consecuencia, en la etapa inicial de asignación de ponderaciones y evaluación, los reservorios catalogados no obtuvieron puntajes ideales. En el caso de los reservorios nuevos fue difícil encontrar sitios que cumplan con una buena calificación en todos los

critérios, lo que redunda en que ninguna calificación ponderada supera los 80 puntos. Esta misma situación se dio en el caso de las centrales existentes, especialmente con relación a los puntajes asociados a las distancias entre reservorios y el ratio salto/distancia. Estos dos últimos criterios debieron ser relajados para lograr tener una muestra suficiente de sitios potenciales.

Respecto a los indicadores de costo se puede precisar que existe una cierta relación entre una buena calificación ponderada y un nivel de precio más competitivo. Como es esperado, los costos estimados de invertir en reservorios con centrales existentes son considerablemente menores que hacerlo en los casos sin reservorios existentes, debido a la reutilización de infraestructura. Es necesario recalcar que los costos estimados son teóricos y tienen

una función referencial y comparativa. Estos en la práctica pueden variar debido a consideraciones técnicas específicas del lugar.

6.2 Áreas principales donde se ubican los reservorios

Para los reservorios existentes, las áreas principales son San Juan (con las áreas de mayor ponderación), Las Matas de Farfán y Constanza.

Para los reservorios nuevos, las áreas principales son San Juan, La Descubierta, Las Matas de Farfán, El Llano. Otras con reservorios ponderados son: Pedro Santana, Restauración, Juan Santiago, Vallejuelo, Los Ríos, Galván, Peralta, Cabral, Polo, La Ciénaga, Paraíso, Enriquillo, Pedernales.

Los resultados encontrados sugieren que existe un potencial cercano a 2.76 GW de potencia instalable de centrales de bombeo en República Dominicana, si se consideran todos los proyectos propuestos evaluados. Las centrales de bombeo propuestas en los cuatro sitios prioritarios (es decir, con “potencial alto”) de reservorios nuevos tienen una potencia sugerida de 27 MW, 39 MW, 77 MW y 88 MW, sumando un total de 231 MW de potencia estimada nueva que se propone instalar de centrales de bombeo con calificación de potencial alto. Por su parte, las centrales de bombeo propuestas en los tres sitios prioritarios de reservorios existentes tienen una potencia sugerida de 125 MW, 206 MW y 433 MW, sumando un total de 639 MW de potencia estimada (dado que las primeras dos potencias corresponden a diferentes combinaciones de la presa sabaneta) que se propone instalar de centrales de bombeo con calificación de potencial alto.

En relación con los costos de instalación estimados, los sitios calificados como “potencial alto” presentan un rango de costo total estimado desde USD 1,896/kW a USD 5,112/kW. En el caso de los 4 sitios de reservorios nuevos propuestos, el rango es de USD 3,700/kW a USD 5,112/kW y, en el caso de los 3 sitios prioritarios de reservorios existentes, el rango de costo total estimado es desde USD 1,896/kW a USD 2,403/kW.

6.3 Recomendaciones de futuros trabajos

Tomando en cuenta los resultados del presente estudio, se proponen futuros trabajos que pueden ayudar a dar certeza y aumentar las opciones que deriven en aumentar el potencial sostenible del país. Entre ellas se pueden nombrar:

6.3.1 Impactos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos en embalses de almacenamiento para centrales de hidrobombeo.

Dado que el cambio climático puede alterar los patrones de precipitación y acrecentar los niveles de evaporación, se propone un estudio cuyo objetivo sea comprender cómo estos cambios pueden influir en la capacidad de almacenamiento de agua y, por ende, en la eficiencia de las centrales de hidrobombeo.

Los principales objetivos pueden relacionarse a:

1. Recopilación de datos históricos, así como de niveles de embalses y temperaturas para realizar proyecciones en la región de estudio.
2. Utilización de modelos hidrológicos para simular el comportamiento de la cuenca y cómo los embalses se verían afectados por diferentes escenarios de cambio climático (considerando factores como la evaporación o las variaciones de caudal).
3. Identificación de medidas de adaptación ante los efectos negativos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos, como la implementación de sistemas de almacenamiento alternativos o la modificación de los patrones de operación de las centrales.

6.3.2 Identificación y estudio de habilitación de reservorios potenciales menores para la construcción de presas de almacenamiento para centrales de hidrobombeo.

Esta propuesta está enfocada en el reconocimiento de potenciales ubicaciones dentro de los reservorios mayores, para la construcción de presas más pequeñas que puedan servir como reservorios de almacenamiento para centrales de hidrobombeo, considerando la construcción de obras civiles como infraestructura de almacenamiento complementarios (por ejemplo, muros de contención).

Los principales objetivos pueden relacionarse a:

1. Evaluación de las características topográficas y geológicas de posibles ubicaciones para determinar la potencial construcción de presas.
2. Análisis de flujos de agua en la cuenca o microcuenca, estimando la cantidad de agua disponible para el almacenamiento y la generación de energía.
3. Evaluación de los posibles efectos ambientales por la afectación antrópica del territorio, su relación con aspectos ecosistémicos o comunidades locales.
4. Realizar un análisis de costos y beneficios para determinar si la construcción y operación de la presa son financieramente convenientes.

6.3.3 Evaluación técnico-económica de reservorios de almacenamiento para centrales de hidrobombeo.

Se propone la realización de un estudio que tenga como objetivo la evaluación de aspectos técnicos como económicos (por ejemplo, la evaluación de la Tasa Interna de Retorno TIR), para centrales de hidrobombeo.

Los principales objetivos pueden relacionarse a:

1. Evaluación de la capacidad de almacenamiento, la eficiencia del proceso de bombeo/generación, la vida útil estimada y otros aspectos técnicos relacionados con el reservorio y las instalaciones de la central.

2. Cálculo de los costos de construcción, operación y mantenimiento del reservorio y la central, así como los ingresos generados por la venta de energía. Realización de un análisis de flujo y rentabilidad del proyecto.

3. Realizar un análisis de sensibilidad respecto a variables como, precios de electricidad, costos de construcción, cambio en los flujos del recurso hídrico en las presas o la incorporación de energías sostenibles complementarias, lo cual podría afectar la viabilidad económica del proyecto.

6.3.4 Optimización de embalses sobre o bajo relieve para la habilitación de reservorios de almacenamiento.

Se propone un estudio centrado en evaluar la optimización de la ubicación y diseño de los embalses, considerando la elevación de las cotas geográficas o el cambio de las características de cuencas para maximizar la eficiencia de los reservorios de almacenamiento utilizados en centrales de hidrobombeo.

Los principales objetivos pueden relacionarse a:

1. Utilización de herramientas de modelado para simular el comportamiento del agua en diferentes escenarios topográficos para determinar cómo se comportarían los embalses en términos de almacenamiento y generación de energía.
2. Comparar los resultados de diferentes ubicaciones y diseños de embalses para identificar cuáles ofrecen el mayor rendimiento en términos de almacenamiento y generación de energía (análisis de eficiencia).
3. Considerar factores como restricción ambientales o implicaciones de ingeniería para asegurar que las soluciones propuestas sean viables.
4. Realizar un análisis que considere aspectos económicos y técnicos para determinar cuál es la mejor opción en términos globales.

6.3.5 Verificación en terreno de las condiciones geográficas analizadas e ingeniería de detalle

Se propone realizar un estudio cuyo objetivo sea validar y refinar la identificación de ubicaciones de presas y la optimización de embalses, a través de una inspección directa en el terreno y la creación de diseños de ingeniería detallados. Esto con la finalidad de llevar los análisis teóricos a la realidad y garantizar que los planes propuestos sean viables y efectivos.

Los principales objetivos pueden relacionarse a:

1. Verificación de la topografía, vegetación y conexiones de embalses propuestos con cuerpos de agua e infraestructura crítica para el proyecto.
2. Recopilación de datos adicionales que puedan haberse omitido en análisis previos, como condiciones climáticas específicas, cambios en la cuenca hidrográficas, entre otros factores.
3. Realización de mediciones directas como: mediciones de caudales, niveles de agua y características del suelo.
4. Elaboración de diseños de ingeniería detallados, abordando aspectos específicos como la geometría de estructuras, materiales y métodos de construcción, cálculos de estabilidad, carga de suelo, hidráulica, etc.
5. Evaluación de posibles impactos ambientales y la propuesta de medidas de mitigación específicas para minimizar los efectos negativos. Esto puede incluir la gestión de residuos y/o la conservación del agua.

7. REFERENCIAS



- Bayazit, Y., Bakış, R., & Koç, C. (2021).** A study on transformation of multi-purpose dams into pumped storage hydroelectric power plants by using GIS model. *International Journal of Green Energy*, 18(3), 308-318. <https://doi.org/10.1080/15435075.2020.1865362>
- CESEL Ingenieros. (2015).** Informe 4: Contratación de una Consultoría Encargada de Completar las Bases de Datos de las Series Hidrológicas para Determinación de la Energía Disponible en las Centrales Hidroeléctricas. Organismo Coordinador Del Sistema Eléctrico Nacional Interconectado de la República Dominicana.
- Fitzgerald, N., Lacial Arántegui, R., McKeogh, E., & Leahy, P. (2012).** A GIS-based model to calculate the potential for transforming conventional hydropower schemes and non-hydro reservoirs to pumped hydropower schemes. *Energy*, 41(1), 483-490. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.044>
- Görtz, J., Aouad, M., Wieprecht, S., & Terheiden, K. (2022).** Assessment of pumped hydropower energy storage potential along rivers and shorelines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, 112027. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112027>

GIZ, Centro de Energía UCh, Ministerio de Energía, Australian National University. (2020). Desarrollo de metodología aplicada en sistemas de información geográfica para identificar potencial de centrales de bombeo con agua de mar en Chile.

Krassakis, P., et al. (2023). GIS-Based Assessment of Hybrid Pumped Hydro Storage as a Potential Solution for the Clean Energy Transition: The Case of the Kardias Lignite Mine, Western Greece.

Rogeeau, A. Girard, R. & Kariniotakis G., (2017). A generic GIS-based method for small Pumped Hydro Energy Storage (PHES) potential evaluation at large scale. Applied Energy, 197, pp.241 - 253. [ff10.1016/j.apenergy.2017.03.103](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.103). [ffhal-01513139f](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.103)

8. ANEXOS

8.1 Centrales Existentes Identificadas

Central existente	Volumen Central (m ³)	Superficie Central (ha)	ID R2	Superficie R2 (ha)	Volumen R2 (m ³)	Puntaje Ponderado	Energía (GJ)	Potencia (MW)	Costo Total por kW (\$/kW)
Presa Sabaneta	137,634	214	364	439	373,993,295	79	3,705	206	2,191
Presa Sabaneta	2,137,634	214	549	272	257,725,632	73	2,244	125	2,636
Presa Yacahueque	287,587	29	771	697	998,462,102	67	7,793	433	2,403
Presa Sabane	2,137,634	214	548	215	215,142,338	63	1,873	104	2,510
Presa Yacahueque	287,587	29	774	301	204,098,236	55	1,562	87	7,601
Presa Yacahueque	287,587	29	743	702	944,962,188	49	7,375	410	2,587
Presa Palma Sola	309,967	31	771	697	998,462,102	48	7,793	433	2,559
Presa Río Blanco	29,602	3	512	600	426,596,431	46	3,778	210	4,187
Presa Yacahueque	287,587	29	745	201	142,528,318	45	1,112	62	25,988
Presa Sabaneta	2,137,634	214	915	458	540,257,082	40	3,892	216	1,896
Presa Yacahueque	287,587	29	1,083	266	455,896,029	39	3,011	167	2,096
Presa Yacahueque	287,587	29	775	191	121,014,658	35	926	51	3,599
Presa Yacahueque	287,587	29	770	80	9,013,200	30	69	4	2,110
Presa Sabaneta	2,137,634	214	943	69	41,783,562	24	295	16	2,095

8.2 Centrales Nuevas Identificadas

R1			R2			Puntaje Ponderado	Energía (GJ)	Potencia (MW)	Costo Total por kW (\$/kW)
ID	Superficie (ha)	Volumen (m³)	ID	Superficie (ha)	Volumen (m³)				
1613	474	212,082,285	548	215	215,142,338	75	710	39	4,484
1185	212	196,210,810	548	215	215,142,338	68	484	27	5,112
5946	728	928,552,739	3187	603	662,025,186	65	1,391	77	4,211
5766	625	851,190,553	2147	595	528,319,260	65	1,586	88	3,700
3608	7	484,761	1174	648	663,292,782	64	2,190	122	2,589
1288	592	566,246,180	548	215	215,142,338	62	549	30	6,193
5873	268	109,039,559	2152	352	121,779,377	62	366	20	7,135
2197	736	405,157,624	936	652	480,700,144	61	1,299	72	4,474
5766	625	851,190,553	2148	211	108,939,499	60	343	19	8,635
2336	476	515,700,552	960	306	179,387,264	60	485	27	6,464
1519	1,046	1,848,182,370	601	660	731,570,025	60	2,086	116	3,703
5920	570	522,520,896	2296	283	253,084,446	58	760	42	5,038
1184	291	341,821,919	548	215	215,142,338	58	484	27	5,710
1802	559	528,184,015	879	436	311,131,130	58	700	39	5,778
5490	296	155,547,260	2148	211	108,939,499	57	327	18	7,165
1714	238	256,848,267	990	366	333,081,462	57	550	31	5,629
2197	736	405,157,624	929	251	89,052,298	57	241	13	12,729
1802	559	528,184,015	686	107	63,282,349	57	190	11	12,042
1614	419	709,645,493	548	215	215,142,338	56	710	39	4,807
1802	559	528,184,015	685	862	600,627,866	56	1,803	100	3,720
1802	559	528,184,015	683	2	84,006	56	0	0	5,910,256
5213	506	567,889,931	2742	474	328,581,719	55	690	38	6,109
1562	1,227	2,588,216,948	548	215	215,142,338	54	678	38	7,190
2387	288	145,014,433	936	652	480,700,144	54	1,371	76	3,828
8138	375	276,239,576	3157	210	215,101,462	54	613	34	4,988
2336	476	515,700,552	879	436	311,131,130	54	934	52	4,662
2336	476	515,700,552	878	280	153,999,589	54	462	26	6,719
1289	136	96,014,069	548	215	215,142,338	53	549	30	4,936
5233	315	157,144,159	2095	69	27,894,526	52	80	4	20,292
1802	559	528,184,015	687	266	191,946,990	52	576	32	6,038
1757	667	611,905,341	696	43	11,129,691	51	32	2	60,861
5187	32	6,553,609	1824	499	196,666,375	51	649	36	5,004
2449	638	872,816,363	1159	507	373,340,439	50	841	47	5,650

R1			R2			Puntaje Ponderado	Energía (GJ)	Potencia (MW)	Costo Total por kW (\$/kW)
ID	Superficie (ha)	Volumen (m³)	ID	Superficie (ha)	Volumen (m³)				
5207	678	500,822,016	2308	1,363	657,463,136	50	1,678	93	4,663
2150	429	361,427,800	986	484	327,319,421	50	835	46	5,120
2336	476	515,700,552	961	15	2,420,984	50	7	0	232,902
5233	315	157,144,159	1847	2	82,096	49	0	0	4,878,928
6690	807	601,319,661	2296	283	253,084,446	49	836	46	5,446
3608	7	484,761	1263	228	152,746,200	49	459	25	4,781
5233	315	157,144,159	1847	2	82,096	48	0	0	4,942,266
2337	282	326,986,546	960	306	179,387,264	48	485	27	6,042
2029	393	527,103,784	990	366	333,081,462	48	700	39	5,393
2387	288	145,014,433	1171	327	262,672,778	48	552	31	5,828
7884	235	153,952,711	4009	243	257,340,191	47	541	30	5,521
10082	493	384,259,076	4681	288	283,527,629	47	553	31	6,239
5920	570	522,520,896	2295	268	162,334,436	47	487	27	7,076
5149	561	349,889,428	2295	268	162,334,436	47	414	23	7,891
5381	828	640,828,544	3046	29	1,185,897	47	2	0	920,092
5149	561	349,889,428	2296	283	253,084,446	47	646	36	5,882
5873	268	109,039,559	2151	176	42,209,366	46	127	7	15,037
6540	555	310,371,508	3958	487	81,187,944	46	134	7	23,154
2150	429	361,427,800	1140	7	1,503,900	46	3	0	442,117
8137	319	313,351,853	3157	210	215,101,462	46	613	34	5,022
5233	315	157,144,159	1981	216	177,979,516	46	534	30	5,722
5149	561	349,889,428	2148	211	108,939,499	46	311	17	9,472
1783	491	505,563,034	1159	507	373,340,439	46	504	28	7,854
2250	470	524,732,844	960	306	179,387,264	45	538	30	6,386
6690	807	601,319,661	2295	268	162,334,436	45	536	30	7,508
1646	818	1,140,625,682	991	965	718,734,902	45	1,079	60	6,102
2387	288	145,014,433	1170	395	220,880,079	45	464	26	6,928
6016	778	959,027,881	2148	211	108,939,499	45	360	20	9,718
5206	505	499,029,028	2332	351	67,736,400	44	173	10	16,370
5766	625	851,190,553	2295	268	162,334,436	44	463	26	7,698
1453	33	13,478,899	1298	1,428	2,789,189,071	44	1,256	70	6,100
5166	272	186,835,803	2148	211	108,939,499	44	294	16	8,136
5490	296	155,547,260	2295	268	162,334,436	44	439	24	6,584
5207	678	500,822,016	2332	351	67,736,400	44	173	10	18,032
2337	282	326,986,546	878	280	153,999,589	44	462	26	6,289

R1			R2			Puntaje Ponderado	Energía (GJ)	Potencia (MW)	Costo Total por kW (\$/kW)
ID	Superficie (ha)	Volumen (m³)	ID	Superficie (ha)	Volumen (m³)				
1453	33	13,478,899	1235	251	188,732,817	44	113	6	14,012
5494	210	138,912,262	2148	211	108,939,499	44	327	18	7,287
1646	818	1,140,625,682	990	366	333,081,462	43	500	28	8,526
6283	716	528,375,235	2869	243	35,989,374	43	92	5	30,134
2150	429	361,427,800	987	281	184,666,606	43	471	26	6,754
2449	638	872,816,363	987	281	184,666,606	42	527	29	7,130
1724	425	454,853,325	934	252	197,486,213	42	385	21	7,762
5790	284	166,783,189	2095	69	27,894,526	42	88	5	20,118
2000	311	479,526,896	635	69	55,903,148	41	185	10	10,776
1453	33	13,478,899	1299	349	418,336,330	41	188	10	11,701
5166	272	186,835,803	2295	268	162,334,436	41	390	22	7,181
539	357	304,330,286	279	109	40,833,958	40	80	4	23,045
1891	517	806,581,089	634	68	54,649,800	40	172	10	13,565
2100	445	222,059,029	1267	211	82,819,830	40	124	7	18,469
5381	828	640,828,544	2548	232	105,467,496	39	269	15	12,789
8544	812	463,291,022	4899	377	118,510,086	39	160	9	21,124
1891	517	806,581,089	635	69	55,903,148	39	176	10	13,434
1825	290	291,948,633	929	251	89,052,298	39	187	10	12,137
2000	311	479,526,896	634	68	54,649,800	39	180	10	11,134
5207	678	500,822,016	2309	266	89,736,170	38	229	13	13,819
7225	760	301,037,624	4140	234	50,929,727	38	92	5	31,346
2337	282	326,986,546	961	15	2,420,984	37	7	0	200,947
8138	375	276,239,576	4088	172	182,818,815	36	384	21	7,265
9602	656	112,943,583	5070	206	19,233,022	35	32	2	77,402
1728	207	238,413,411	929	251	89,052,298	35	174	10	12,329
5381	828	640,828,544	3052	130	34,187,591	33	67	4	41,044
5802	300	369,406,575	4512	252	170,344,343	33	153	9	14,880
2250	470	524,732,844	961	15	2,420,984	32	7	0	246,736
5207	678	500,822,016	2333	10	704,853	29	2	0	1,173,088
2149	393	263,943,571	1140	7	1,503,900	27	3	0	522,959
1174	648	663,292,782	696	43	11,129,691	24	18	1	115,090



Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Registered offices
Bonn and Eschborn

Friedrich-Ebert-Allee 32 + 36
53113 Bonn, Germany
T +49 228 44 60-0
F +49 228 44 60-17 66

Dag-Hammarskjöld-Weg 1 - 5
65760 Eschborn, Germany
T +49 61 96 79-0
F +49 61 96 79-11 15

E info@giz.de
I www.giz.de