

Estado de Avance del Estudio de Factibilidad de la Restauración de Micro Aprovechamientos Hidroeléctricos (M.A.H) en la Provincia de Misiones y su Consecuente Conexión al Sistema Interconectado Provincial

Cichanowski, Guillermo M.^{a*}, Gomez, Luciana C.^{a*}, Haddad, Dario K.^{a*} Heck, Rodrigo N.^{a*}
Puertaz, Martin^{a,b}, Berent, Hector F.^a

^a *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*

^b *Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Energía Eléctrica (LIDEE), Oberá, Misiones, Argentina.*

e-mails: cichanowskig@gmail.com, lucianacceleste@gmail.com, dkarimhaddad@gmail.com, rodriheck@gmail.com, puertazmartin@gmail.com, hectorberent71@gmail.com

Resumen

El presente trabajo se enmarca en el desarrollo de la asignatura “Proyecto Electromecánico 2”, y tiene como objetivo detallar el estado de avance del estudio de factibilidad para la restauración de ocho micro aprovechamientos hidroeléctricos ubicados en distintos puntos de la provincia de Misiones. Estos aprovechamientos se encuentran actualmente inoperativos y en estado de abandono. La factibilidad consiste en un análisis del estado actual de cada aprovechamiento, ubicados en los arroyos “El Persiguero” (Oberá), “El Dorado” (Oberá), “Arroyo Central” (San Antonio), “Arroyo Pesado” (San Antonio), “El Tarumá” (Guaraní), “Salto Pereyra” (Cainguas), “El Tigre” (Oberá) y “Salto Carlitos” (L.N.Alem), en los cuales se realizan trabajos de campo para determinar las características hidrológicas actuales y el estado de la obra civil existente. De esta manera, se estimará la potencia de diseño y se considerará el rediseño o restauración de los sistemas de conducción, además, se analizará la selección de transformadores de potencia y su conexión al paso de transmisión más cercano en cada caso.

Palabras Clave – Micro generación, Generación de Energía Eléctrica, Energías Renovables, Hidroelectricidad, Análisis de factibilidad

1. Introducción

En respuesta a la creciente demanda y necesidad de generar energía a través de fuentes renovables, ha surgido la iniciativa de investigar el estado actual de los micro aprovechamientos hidroeléctricos (MAH) establecidos y abandonados en distintos puntos de la provincia de Misiones.

La energía hidráulica en pequeña escala se enmarca dentro de las energías renovables promovidas en la actualidad para diversificar la matriz energética nacional [7], un objetivo con el cual el país se ha comprometido a través de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7)[8], que buscan fomentar el acceso a las energías renovables.

Las microcentrales estudiadas, originalmente, han abastecido de electricidad a numerosas familias y establecimientos rurales, funcionando de manera aislada. No obstante, la llegada del sistema de electrificación rural y el aumento del costo de mantenimiento de las instalaciones, han llevado al abandono de dichos sistemas.

Puntualmente este proyecto, tiene como objetivo analizar desde un punto de vista técnico, y teniendo en cuenta los aspectos legales, ambientales y económicos, la factibilidad de rediseñar los proyectos originales, de manera que pueda insertarse la potencia generada al sistema interconectado provincial.

2. Análisis de estado

Para comenzar el análisis de estado actual de cada emplazamiento, se presentarán los parámetros relevados en cada caso, y los métodos utilizados para llevar a cabo dichos procedimientos.

2.1. Ubicación geográfica de los emplazamientos

Los emplazamientos estudiados están ubicados en distintos puntos de la provincia, como se indica en la Tabla 1. Para una mejor caracterización hídrica, se ha recurrido al Ingeniero Civil Tomas Rodríguez, perteneciente a la cátedra de Hidrología, del departamento de Ingeniería Civil, para realizar la delimitación geográfica de la cuenca de cada arroyo.

Los emplazamientos relevados hasta el momento son: El Persiguero, Carlitos y El Tarumá, por lo que se han podido determinar las coordenadas exactas de la ubicación de los arroyos. Ésta es información de fundamental importancia para realizar el estudio de las cuencas mediante el Software de análisis.

Tabla 1: Ubicación de los emplazamientos[1]

Microaprovechamiento	Ubicación	Latitud	Longitud
1. El Persiguero	Campo Ramon	-27,386028	-55,044833
2. Carlitos	L.N. Alem	-27,680721	-55,234251
3. El Tarumá	San Vicente	-27,01555	-54,414897

2.2. Relevamiento de emplazamientos

Para realizar la caracterización de los aprovechamientos, se realizaron relevamientos in situ de los mismos, en esta etapa, se recopiló información detallada sobre el estado general de las instalaciones, incluyendo las características hidrológicas y los aspectos estructurales y de funcionamiento.

2.2.1. Determinación de caudales

En esta sección se expondrán los caudales calculados con base en los datos recolectados durante las visitas a los emplazamientos, sin embargo, es importante destacar que los valores medidos durante los relevamientos no pueden considerarse completamente representativos del comportamiento hidrográfico, debido a posibles efectos causados por épocas de lluvia o sequías en las fechas de determinación.

Considerando este factor, se ha decidido determinar los caudales utilizando los datos obtenidos mediante el estudio hidrográfico realizado mediante el Software de análisis mencionado anteriormente, el cual ha permitido delimitar la ubicación de las cuencas y con esto, se han obtenido resultados más precisos y confiables.

Para obtener los caudales de los emplazamientos visitados, se han realizado mediciones de profundidad a intervalos regulares a lo ancho del cauce de los arroyos, y se han trazado perfiles hidráulicos para caracterizar el comportamiento del flujo en dichas áreas.

Además, se han efectuado mediciones de los tiempos de desplazamiento de un flotador, técnica utilizada en ensayos hidrológicos para determinar la velocidad del flujo de agua, teniendo en cuenta el tiempo que tarda dicho flotador en recorrer una distancia conocida[11]. El tiempo de

desplazamiento se ha medido en dos instancias, una correspondiente al flotador libre y otra que corresponde al flotador con peso, luego, se ha determinado un promedio.

Por otra parte, para obtener los caudales mediante el software de análisis hidrográfico, se utilizaron datos geoespaciales y topográficos que permitieron definir con mayor precisión la ubicación y límites de las cuencas hidrográficas asociadas a cada emplazamiento.

La combinación de datos provenientes de mediciones de campo y la utilización del software de análisis hidrográfico permitió generar una evaluación mas completa de los caudales en estudio.

A continuación, se presentan las ecuaciones que serán utilizadas comúnmente para los cálculos de los caudales de los emplazamientos desarrollados en la siguiente sección.

$$v = \frac{d}{t} [g] \quad (1)$$

donde: $v [m/s]$: Velocidad del flotador ; $d [m]$: Distancia recorrida ; $t [s]$: Tiempos medidos

$$Q = A * v [g] \quad (2)$$

donde: $Q [m^3/s]$: Caudal modulo ; $A [m^2]$: Area del canal

1) El Persiguero

Tabla 3: Medición de profundidades [cm] [1]

	h0	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8	h9	h10	h11	h12
0 [m]	14	15	17	16	16	15	17	17	19	17	17	13	-
1 [m]	10	11,5	12	15	14	13	13	13	13	14	15	12	6
2 [m]	1	5	8	13	13	13	13	13,5	13,5	14	15	12	-
3 [m]	12	17	16	15	15	15	15	15	15	12,5	-	-	-
4 [m]	15	15,5	16	16	16	16	16	16,5	16,5	14	15	-	-
5 [m]	5	6	11	13	13	13,5	15	13,5	13	11	10	9	3

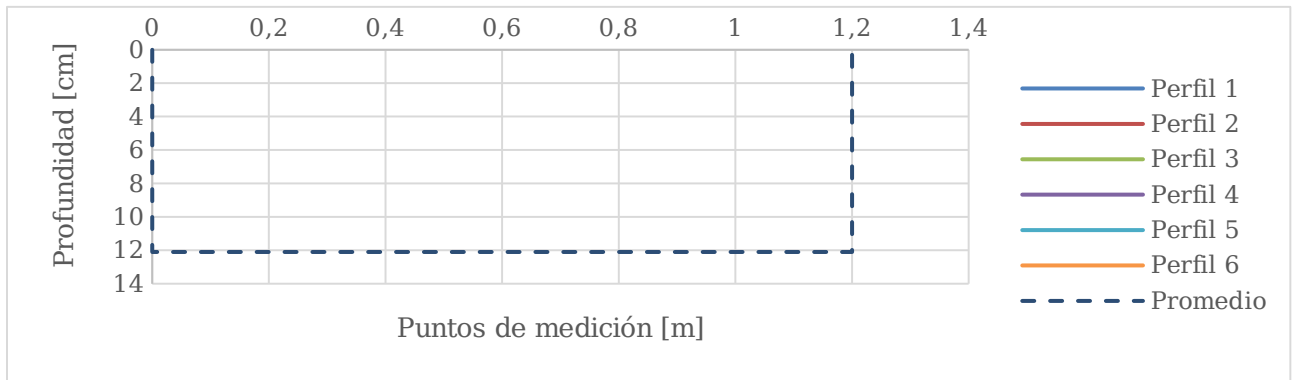


Fig. 1. Trazado de perfiles [1]

Tabla 4: Medición de tiempos de desplazamiento [1]

Flotador libre	Tiempo [s]	Flotador con peso	Tiempo[s]
Medición 1	16,53	Medición 1	16,72
Medición 2	16,85	Medición 2	21,69
Medición 3	19,03	Medición 3	18,22
Medición 4	17,66	Medición 4	21,82
Medición 5	17,13	Medición 5	19,84
Medición 6	24,56	Medición 6	27,85

Tabla 5: Resumen de parámetros calculados a partir del relevamiento [1]

Promedio de tiempos de desplazamiento [s]	21,06
Distancia recorrida [m]	5
Velocidad [m/s]	0.238
Área promedio [m ²]	0.145
Caudal [l/s]	34.5

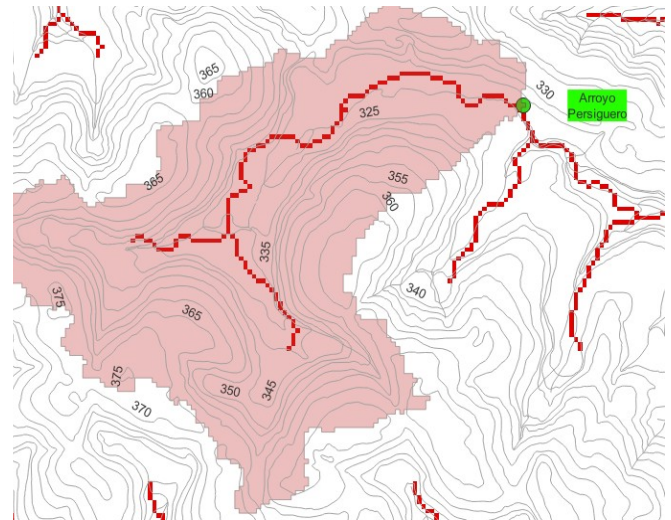


Fig. 2. Delimitación de la cuenca en relieve [2]

Fig. 3. Curvas de nivel [2]

El software de análisis hidrográfico indica los valores de área de la cuenca analizada, y para determinar el caudal en una primera aproximación, se multiplicará el valor del área en Km² por un factor α denominado Caudal específico [10].

$$\alpha = 17 \left[\frac{\text{litros}}{\text{km}^2 \text{ s}} \right] \quad (3)$$

Tabla 6: Parámetros obtenidos mediante software [2]

Área			Caudal
m ²	Ha	Km ²	L/s
5578427,3	557,8 4	5,58	94,86

En este caso, se puede observar que el caudal obtenido mediante los parámetros arrojados por el software es mucho mayor al caudal calculado con los datos del relevamiento. Esto puede explicarse por el hecho de que propietarios de un terreno ubicado aguas arriba de la zona de la presa, han construido una pileta natural, interrumpiendo el libre flujo del arroyo, por lo que la zona del embalse del aprovechamiento se encuentra actualmente con muy poco caudal.

2) *Carlitos*

Tabla 7: Medición de profundidades [1]

	h₀	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8	h9	h10	h11	h12	h13	h14
0 [m]	42	70	94	115	118	115	$\frac{11}{2}$	107	102	79	79	102	106	87	64
1 [m]	10	55	89	107	120	118	$\frac{12}{0}$	117	112	93	78	88	81	68	44
2 [m]	20	62	105	112	114	115	$\frac{11}{6}$	112	101	89	85	83	79	72	8
3 [m]	0	86	96	108	109	110	$\frac{10}{8}$	104	95	87	90	87	89	65	0
4 [m]	0	47	67	90	100	100	$\frac{10}{3}$	97	92	93	90	96	91	76	0
5 [m]	5	47	67	75	77	88	98	94	94	92	90	94	76	50	0

Fig.

4. Trazado de perfiles [1]

Tabla 7: Medición de tiempos de desplazamiento [1]

Flotador libre	Tiempo [s]	Flotador con peso	Tiempo[s]
Medición 1	201	Medición 1	219
Medición 2	270	Medición 2	273
Medición 3	245	Medición 3	242
Medición 4	236	Medición 4	235
Medición 5	242	Medición 5	239

Medición 6	252	Medición 6	247
-------------------	-----	-------------------	-----

Tabla 8: Resumen de parámetros calculados a partir del relevamiento [1]

Promedio de tiempos de desplazamiento [s]	246
Distancia recorrida [m]	10
Velocidad [m/s]	0,041
Área promedio [m ²]	5,26
Caudal [l/s]	236,83



Fig. 5. Delimitación de la cuenca en relieve [2]

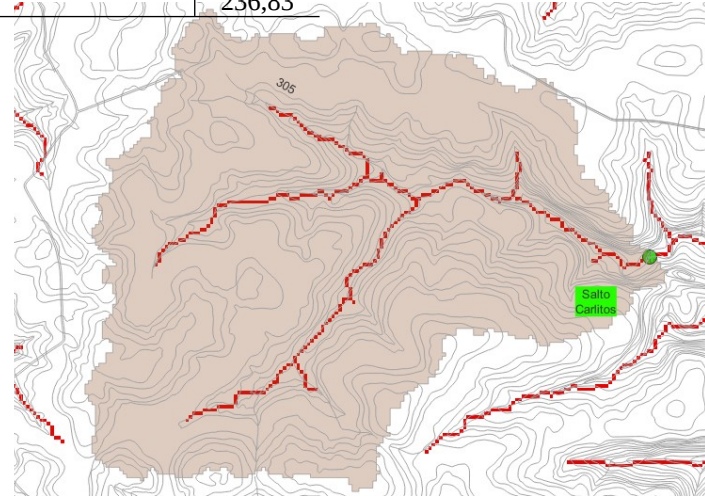


Fig. 6. Curvas de nivel [2]

Con el mismo factor de caudal específico (3), se determina el caudal obtenido a partir de los parámetros del software.

Tabla 9: Parámetros obtenidos mediante software [2]

Área			Caudal
m ²	Ha	Km ²	L/s
12843678,6	1284,37	12,84	218,28

En este caso, el valor de caudal obtenido mediante los parámetros arrojados por el software no difiere en gran medida de los valores calculados en base a los datos relevados, esto nos indica que el caudal del arroyo no ha variado en los últimos tiempos, por lo que puede asegurarse que es un valor confiable para basar el proyecto de diseño.

3) *El Tarumá*

En el micro aprovechamiento El Tarumá, existe un canal de derivación de sección rectangular, por lo tanto, las secciones del mismo se ha medido de forma directa, resultando lo expuesto en la Fig. 7.

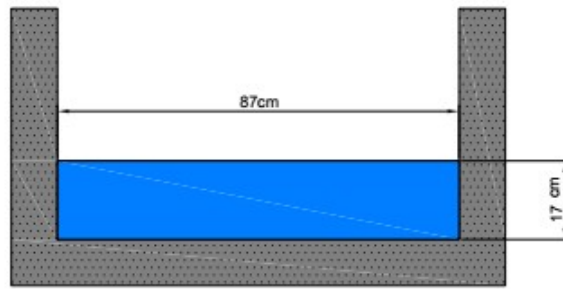


Fig. 7. Perfil del canal de derivación [1]

Tabla 10: Medición de tiempos de desplazamiento [1]

Flotador libre	Tiempo [s]	Flotador con peso	Tiempo[s]
Medición 1	1,3	Medición 1	1,2
Medición 2	1,7	Medición 2	1,5
Medición 3	1,8	Medición 3	1,7
Medición 4	1,7	Medición 4	1,7
Medición 5	1,5	Medición 5	1,3
Medición 6	1,7	Medición 6	1,5

Tabla 9: Resumen de parámetros calculados a partir del relevamiento [1]

Promedio de tiempos de desplazamiento [s]	1,65
Distancia recorrida [m]	3
Velocidad [m/s]	1,8
Área promedio [m ²]	0,148
Caudal [l/s]	273,12



Fig. 8. Delimitación de la cuenca en relieve [2]

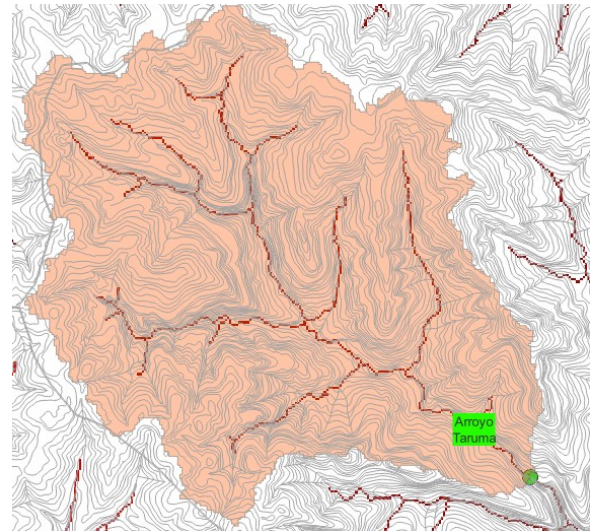


Fig. 9. Curvas de nivel [2]

Tabla 10: Parámetros obtenidos mediante software [2]

Área		Caudal	
m ²	Ha	Km ²	L/s
29828103,5	2982,21	29,82	506,94

En este caso, se puede notar una gran diferencia entre el caudal calculado a partir de las mediciones realizadas en trabajo de campo y el caudal determinado mediante los parámetros analizados por software, y esto puede justificarse con el hecho de que en las mediciones se han realizado durante un periodo prolongado sin lluvias, lo cual tuvo un impacto significativo en el caudal del arroyo en esa temporada. Sin embargo, los datos obtenidos a partir del software representan un ciclo hidrológico que tiene en cuenta la distribución de precipitaciones a lo largo del año, por lo que puede considerarse un valor más confiable y aceptable a fines de diseño.

2.3. Caudal de diseño

Para determinar concretamente el caudal de diseño de las micro centrales, se tuvo en cuenta que no se puede utilizar la totalidad del caudal modulo calculado, debido a que se ha adoptado como referencia, la legislación provincial, como se indica en [3], que indica que debe permitirse el libre flujo de un 30% del caudal modulo, esto se conoce como *Caudal Ecológico*, y asegura la disponibilidad de agua para el desarrollo de la diversidad biológica presente, la migración de especies, procesos de reproducción y alimentación de animales, entre otros.

$$Q_{ecologico} = Q_h * 0.3 [3] \quad (4)$$

donde: $Q_h [l/s]$: Caudal modulo historico

Mediante la expresión (4) se han determinado entonces el Caudal ecológico, siendo, el restante, el caudal de diseño final para el análisis. En este apartado, se utilizará el valor de los caudales modulo históricos, obtenidos de relevamientos realizados en años anteriores por profesionales de la unidad de estudio, debido a que se considera que el valor relevado en un solo día, no es completamente representativo.

Tabla 11. Caudales considerados [1]

Emplazamiento	Caudal modulo [l/s]	Caudal ecológico [l/s]	Caudal de diseño [l/s]
<i>El Persiguero</i>	94,86	23,45	66,402
<i>Carlitos</i>	228,18	68,45	159,72
<i>Tarumá</i>	506,94	152,08	357,85

3. Determinación de potencias

Se han determinado los valores de potencias que se podrían obtener en cada aprovechamiento según la ecuación (5) y con los resultados obtenidos, se ha realizado una comparación con los valores de potencias de los proyectos originales, tal como se indica en la Tabla 8.

$$N = g * \rho * 0,7 * H * Q [9] \quad (5)$$

donde:

$N [kW]$: Potencia generada; H : Altura neta del salto; $0,7$: Rendimiento de turbina; $g \left[\frac{m}{s^2} \right]$: Gravedad; ρ : densidad

Tabla 12. Comparación de potencias [1]

Emplazamiento	Altura neta [m]	Potencia de diseño [kW]	Potencia original [kW]
---------------	-----------------	-------------------------	------------------------

<i>El Persiguero</i>	9	4,1	8
<i>Carlitos</i>	10	11	15
<i>Tarumá</i>	30	73	40,5

4. Diseño del sistema hidroeléctrico

4.1. Selección de turbinas

Con los resultados obtenidos hasta el momento en los diferentes trabajos de campo realizados, en contraste con los análisis numéricos realizados, se ha podido determinar la selección de turbinas, utilizando el ábaco mostrado en la Fig.10, en el cual se ingresa con el valor de la altura neta y del caudal considerado en cada caso, interceptando a las líneas de potencia correspondiente, para dar con una primera selección preliminar de la turbina a utilizar en cada caso.

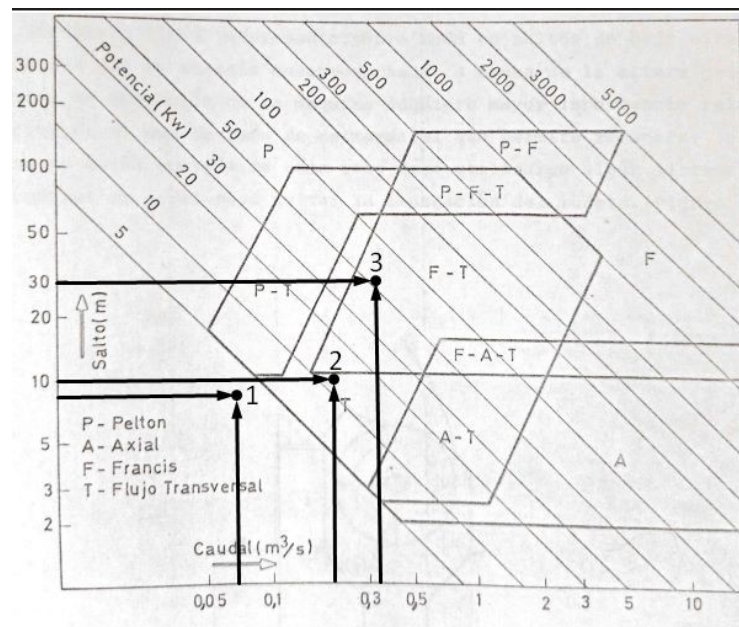


Fig. 10. Diagrama de selección de turbinas [4]

Como se puede observar, en los 3 casos se indica la utilización de turbinas Michel Banki, o de flujo cruzado, cabe destacar que este tipo de turbinas también fueron utilizadas en los proyectos originales, pero actualmente, en ninguno de los emplazamientos relevados existen estas turbinas mencionadas. Las turbinas Michel Banki tienen un diseño compacto, y es adecuada para caudales moderados y alturas de caída relativamente bajas. La característica distintiva, es la orientación del flujo de agua, en un ángulo recto con respecto al eje de rotación de la turbina. La energía cinética del agua, entra en la turbina a través de las paletas de la rueda, provocando la rotación del eje y generando energía mecánica.

4.2. Tubería forzada

Mediante los estudios y relevamientos efectuados, se ha evaluado el estado actual de la tubería forzada en cada emplazamiento. En el caso del microaprovechamiento El Persiguero, se ha constatado que la tubería forzada exhibe un estado general satisfactorio, aunque se requerirá de un análisis detallado para evaluar la reparación de algunas bridas de unión que presentan inconvenientes.

En contraste, en los microaprovechamientos Carlitos y El Tarumá, se ha observado que la tubería forzada se encuentra completamente deteriorada, lo cual demanda un proceso de rediseño exhaustivo.

Se contemplará la revisión y ajuste de la geometría, así como la selección adecuada de materiales a emplear. Sin embargo, se conservará la traza original de la tubería, manteniendo la configuración y el trayecto de los proyectos iniciales.

5. Conclusiones

Este informe se ha enfocado en detallar el progreso del estudio de factibilidad para la restauración de las microcentrales hidroeléctricas establecidas en la provincia, las cuales actualmente se encuentran inoperativas. Los trabajos de campo realizados han sido fundamentales para obtener una evaluación precisa del estado actual de cada microaprovechamiento y, a partir de esta información, determinar las condiciones técnicas que podrían ser rediseñadas para revitalizar estos proyectos.

El enfoque ecológico del trabajo ha sido primordial, asegurando el cumplimiento de las legislaciones y regulaciones medioambientales establecidos. Por otro lado, en el proceso de planificación, se ha tenido en cuenta el respeto a la propiedad privada, teniendo en cuenta que algunos de los emplazamientos se encuentran ubicados en terrenos privados, cuyos propietarios participaron a través de un convenio, en la realización de los proyectos originales.

Hasta el momento, se ha realizado el relevamiento de tres microaprovechamientos, sin embargo, el proyecto de rediseño de la microcentral “El Doradito” en Oberá, ha sido descartado debido a la inaccesibilidad del terreno privado para el relevamiento del estado actual.

La revitalización de estas microcentrales hidroeléctricas no solo representa una oportunidad de reactivar fuentes de energía renovable y contribuir al sistema energético provincial, sino que también tiene el potencial de generar beneficios económicos y sociales a nivel local.

En conclusión, el avance del trabajo hasta el momento es satisfactorio, ya que ha permitido realizar análisis exhaustivos en los emplazamientos ya relevados. En combinación con el análisis económico que se llevara a cabo, los resultados obtenidos serán fundamentales para la evaluación de la factibilidad del proyecto en su totalidad.

6. Referencias

[1]	Gráficos y tablas de elaboración propia, 2023.
[2]	Gráficos y tablas obtenidas mediante Software de análisis hidrográfico Qgis, 2023.
[3]	Digesto Jurídico de la provincia de Misiones[En línea]: http://digestomisiones.gob.ar/ Ley N° XVI -15. [Último acceso: Mayo 2023].

[4]	SKAT-CETAL, Experiencias locales con Micro Hidrotecnología, Chile: Skat-Cetal, 1981.
[5]	J.G Velasco, Energías Renovables, Barcelona: Reverté S.A, 2012.
[6]	D. Muguerza, Manual de Microcentrales Hidroeléctricas, Buenos Aires, 2010.
[7]	Boletín Oficial de la Nación Argentina [En Línea] https://www.boletinoficial.gob.ar/seccion/primera/Resolucion/609/2023 [Último acceso: Julio 2023].
[8]	Gobierno de Argentina [En Línea] https://www.argentina.gob.ar/politicassociales/ods/ [Último acceso: Julio 2023].
[9]	C. Mataix, Mecánica de los Fluidos y Máquinas Hidráulicas, Madrid: Ediciones del Castallo S.A, 1982.
[10]	Sistema Nacional de Información Hídrica [En Línea] https://snih.hidricosargentina.gob.ar/Filtros.aspx [Último acceso: Junio 2023]
[11]	ICC, Manual de Medición de Caudales, Guatemala, 2017.