



ESTIMACIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN UNA COMUNIDAD AISLADA: LAGO HERMOSO, NEUQUÉN

*Carina A. Insaurralde*¹
*Claudia Palese*¹

(Manuscrito recibido el 09 de Agosto de 2021, en versión final 15 de Octubre de 2021)

Para citar este documento

Insaurralde, C. A. & Palese, C. (2021). Estimación del recurso eólico en una comunidad aislada: Lago Hermoso, Provincia del Neuquén. *Boletín geográfico*, 43 (2), 31-47.

Resumen

El objetivo de este trabajo es evaluar el recurso eólico en Lago Hermoso que es una comunidad rural dispersa que no tiene acceso a las redes de distribución de energía eléctrica, imprescindible para su crecimiento. La localidad no cuenta con datos meteorológicos ni con datos de censo poblacional que incluya el hábito de consumo energético de sus habitantes. Por ello, se utilizó una metodología indirecta consistente en dos etapas, en primer lugar, se determinó el clima eólico regional en mesoescala, para ello se utilizaron de mediciones del viento de estaciones meteorológicas distantes pero afectadas por el mismo clima eólico y un modelo de conservación de la masa. Posteriormente, se estimó el recurso en microescala en el asentamiento y sus alrededores utilizando un modelo lineal y los resultados del modelo de mesoescala. También, en forma indirecta, se propuso una primera estimación del consumo de energía eléctrica y bajo supuestos se calculó el potencial de energía eólica. Los resultados mostraron que hay numerosos sectores con muy buena a extraordinaria calidad de vientos. El área analizada es apta para planear aprovechamientos de la energía eólica puesto que se podría satisfacer la demanda de energía eléctrica con este recurso.

Palabras clave: Comunidad aislada, Lago Hermoso, Densidad de potencia eólica, Distribución superficial del viento, Recurso eólico.

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue. Buenos Aires 1400, C.P. 8300, Neuquén, Argentina. Tel. 0299 4490322. E-mail: carina.andrea.insaurralde@gmail.com; claudia.palese@fain.uncoma.edu.ar

WIND RESOURCE ESTIMATION IN AN ISOLATED COMMUNITY: LAGO HERMOSO, NEUQUÉN

Abstract

The objective of this paper is to evaluate the wind resource in Lago Hermoso, which is a dispersed rural community that does not have access to electricity distribution networks, since it is essential for its growth. Lago Hermoso does not have meteorological data or population census data that includes the energy consumption habit of its inhabitants. An indirect methodology consisting of two stages was used, firstly, the regional mesoscale wind climate was determined, for this, wind measurements from distant meteorological stations but affected by the same wind climate and a mass-consistent model were used. Subsequently, the microscale resource was estimated using a linear model and the results of the mesoscale model. Also, indirectly, a first estimate of electrical energy consumption was proposed and under assumptions the potential wind energy was calculated. The results showed that there are numerous sectors with very good to extraordinary quality of winds. The analyzed area is suitable for planning the use of wind energy since the demand for electricity could be satisfied with this resource.

Keywords: Isolated community, Lago Hermoso, Wind power density, Near-surface wind speed distribution, Wind resource.

Introducción

El presente trabajo se desarrolla en un marco mundial de creciente interés en el cambio de las matrices energéticas. Las Energías Renovables juegan un papel fundamental en este nuevo camino que se proponen las naciones. Asimismo, resulta una opción importante en la generación aislada, reemplazando equipos que utilizan combustibles fósiles o formando parte de sistemas híbridos. Argentina tiene un potencial enorme para afrontar los compromisos con las energías limpias, ya que cuenta con una gran extensión de territorio atravesado por distintos climas, relieves, ríos y salida al mar.

La Patagonia tiene una baja densidad poblacional con respecto al resto del país, y aún existen muchas comunidades rurales dispersas que no tienen acceso a las redes de distribución de energía eléctrica (Catuogno, Villa, Pleitavino, Alinei & Catuogno, 2020). Además, la región patagónica es considerada de las de mayor potencial eólico en el mundo (Lu, McElory & Kiviluoma, 2009; Lamónica, 2008), por lo que realizar proyectos relacionados a este tipo de energía resultan de gran interés para acercar la electricidad a estos asentamientos. Tal es el caso de Lago Hermoso (LH), que no se encuentra conectado a ninguna red de abastecimiento eléctrico y tampoco cuenta con generación eléctrica propia. Para incentivar el crecimiento y desarrollo de la localidad, surge la necesidad de estudiar el recurso eólico en la zona, como una alternativa viable para poder abastecer de energía el lugar.

Los estudios relacionados con la evaluación del recurso eólico han demostrado ser de gran ayuda para la instalación de diferentes tecnologías de energía eólica, tanto en escalas pequeña, mediana y de gran escala para la generación de energía eléctrica como se observa en Murthy y Rahi (2017) y en Kruyt, Dujardin y Lehning (2018).

El objetivo de este trabajo es evaluar el recurso eólico en LH que servirá de base para analizar la factibilidad de instalación de un parque eólico como respuesta a la creciente demanda de energía eléctrica que allí existe.

Área de estudio

Lago Hermoso está ubicado en el departamento Lácar de la provincia del Neuquén, Argentina, aproximadamente a 35 km de la ciudad de San Martín de los Andes por la Ruta de los siete Lagos (Ruta Nacional 40). El lago se caracteriza por sus aguas cristalinas y calmas, en las que es posible navegar, pescar y realizar deportes acuáticos. Sus costas están rodeadas de bosques autóctonos de especies de *Nothofagus* (coihue, lenga, ñire y raulí). Sobre la ruta y la costa del lago hay restaurantes que ofrecen comida patagónica y que son muy atractivos para el turismo. A metros de la cascada del Río Hermoso, se ubica un camping. En cercanías del lugar hay hoteles, cabañas y refugios. Si bien todavía son pocos, la oferta aumenta en cantidad y calidad año a año. En la Figura 1 se muestran algunas imágenes de la zona. La ruta es una de las opciones más elegidas por el turismo local e internacional en la Patagonia. Los esfuerzos por ampliar la oferta turística y mejorar las condiciones de vida de los pobladores necesitan estar acompañados de un buen servicio de energía eléctrica, hecho que alentó al Ente Provincial de Energía del Neuquén (EPEN) a impulsar el desarrollo de este trabajo.



Figura 1. Relieve de Lago Hermoso (LH). (a) Fotografías del lago y el asentamiento. (b) Ubicación en la imagen satelital Google Earth (Maxtar Technologies, CNES/Arbus del 06/03/2018).

Metodología

Lago Hermoso no está conectado al sistema provincial ni al nacional de

transporte de energía eléctrica, es decir, es una comunidad aislada. Tampoco hay un relevamiento del consumo energético de los usuarios, por lo que, como una primera aproximación se estableció la demanda de energía eléctrica que habría que abastecer.

La topografía de la zona presenta rasgos de terreno complejo, como se aprecia en la Figura 1 y en modelo digital de elevación de la Figura 2. En la localidad no hay datos de viento medidos y la distribución del viento dentro de la capa límite atmosférica tiene una fuerte dependencia con el relieve, por ello, se recurrió a una metodología indirecta que consistió en simular el campo de vientos a nivel regional, en un dominio de decenas de kilómetros alrededor de la localidad, para luego, obtener la distribución de la velocidad media anual en microescala en un subdominio de algunos kilómetros alrededor del sitio. La resolución espacial horizontal del mapa eólico regional se fijó en 219 m y la del local en 50 m, en ambas direcciones horizontales.

Si bien hay un mapa del potencial eólico de la región (Pedro, Mattio, Palese, Warchomicka & Lassig, 2006), su resolución espacial horizontal es baja (1200 m), por lo tanto, en este trabajo se mejoró dicha resolución espacial para obtener una representación más precisa de las características del terreno y, por lo tanto, del efecto que tiene el relieve sobre el potencial eólico.

Demanda Eléctrica en Lago Hermoso.

Como ya se mencionó LH no está conectado a ninguna red de abastecimiento de energía eléctrica. Tampoco hay un relevamiento de consumo de energía, que está a cargo de cada uno de los pobladores.

Con la finalidad de estimar la demanda eléctrica se realizó un conteo de las viviendas mediante una imagen satelital Google Earth del 26/03/2018 (disponible sin nubosidad) con la que se identifican 91 viviendas en cercanías del lago y la ruta. Si bien este método involucra un error, no hay datos de censo poblacional que tenga en cuenta la población, la cantidad de viviendas, artefactos eléctricos y tipo de calefacción, entre otros, por ello, se debió estimar tanto la cantidad y tipo de artefactos eléctricos como el hábito de consumo energético de los habitantes.

Actualmente, en el asentamiento, hay dos proyectos de loteo llamados *Lago Hermoso Alto* de 277 lotes y *Lago Hermoso Bajo* de 322 lotes, que serán futuras zonas de demanda de energía eléctrica, pero se desconoce en qué lapso de tiempo se establecerían. Estos loteos surgen del anteproyecto del EPEN que consiste en la extensión de una línea eléctrica cercana (Argañaraz, C., comunicación personal, 2018). Esto aumentará la demanda energética, ya que teniendo en cuenta las 91 viviendas relevadas utilizando la imagen satelital y los nuevos 599 lotes, habría 690 consumidores de energía eléctrica en un futuro indeterminado.

Para establecer el consumo anual de energía eléctrica se seleccionaron varios elementos comunes que se utilizan en viviendas residenciales con los datos de consumo de artefactos que brinda el Ente Nacional Regulador de la Electricidad en su página web (Ente Nacional Regulador de la Electricidad, 2018). Se determina una cantidad de artefactos y se estiman las horas de uso al día como se muestra en la Tabla 1.

Los elementos de la tabla se seleccionaron como una primera aproximación, pero podrían ser otros acorde a las necesidades de cada vivienda. Se estima un consumo mensual por vivienda de 100 kWh/mes. Si se tuvieran en cuenta las luminarias prendidas más horas, computadoras, televisores, entre otros aparatos, el consumo mensual podría ser el doble o más. No se han considerado en este trabajo la calefacción de viviendas, ya que puede lograrse por otros medios y, además, aumentaría radicalmente estas estimaciones. Cabe destacar que en el Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER), que busca abastecer hogares rurales dispersos y escuelas rurales mediante la incorporación de equipos que utilizan energías renovables, las demandas tenidas en cuenta corresponden sólo a iluminación, comunicación e informática.

<i>Elemento</i>	<i>Consumo por hora [Wh]</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Horas de uso por día</i>	<i>Consumo por mes [kWh]</i>
Lámpara de bajo consumo 20 W	20	2	2	2,40
Tubo fluorescente de 36 W	36	2	4	8,64
Lavarropas automático 5 kg	175	1	1	5,25
Heladera con freezer	90	1	24	64,80
Electrónica	30	2	10	18,00
Total mensual				~ 100,00

Tabla 1. Consumo de artefactos comunes en viviendas residenciales (Wh), horas estimadas de uso por día, consumo por mes (kWh).

Para las 91 viviendas consideradas se estimó un consumo de 9,2 MWh/mes y 111,0 MWh/año, esta es la demanda de energía eléctrica a satisfacer sin tener en cuenta los nuevos loteos puesto que se desconoce cuándo estarán completados.

Elaboración de Mapa Eólico Regional.

En la etapa de elaboración del mapa del potencial eólico regional se utilizó el software ArgentinaMap que tiene un modelo de mesoescala de conservación de la masa dentro de la capa límite atmosférica basado en NOABL (Numerical Objective Analysis of Boundary Layer) combinado con un sistema de información geográfica (Brower, 1998) que fue modificado por CREE (Centro Regional de Energía Eólica). Sus principales características se pueden encontrar en Potts, Pierson, Maticen, Harnel y Babau (2001) y en Troncoso Schenker, Ferreyra y Palese (2018). Este software fue utilizado por Hualpa y Milani (2007) y por Pedro et al. (2006) para la elaboración de sendos mapas del potencial eólico provincial.

Las características geográficas como la longitud de rugosidad y el relieve se guardan en ArgentinaMap en una estructura de datos raster.

El modelo fue configurado para obtener la distribución del campo de viento regional con una resolución espacial horizontal de 220 m, a una altura de 30 m sobre el nivel del suelo debido que esta es, aproximadamente, la altura máxima de las

especies forestales nativas de la zona (*Nothofagus*). La malla utilizada es conforme al terreno y tiene 412 nodos en la dirección *X* y 667 en la dirección *Y*. El dominio rectangular de la simulación se observa en la Figura 2.

La distribución del campo de viento regional consiste en el cálculo de la frecuencia de ocurrencia de las direcciones y la probabilidad de las velocidades del viento en cada punto de malla. Dichas características se calcularon en forma direccional en 12 sectores (cada 30°).

Mediciones del viento.

En la Tabla 2 se describen las principales características de las estaciones meteorológicas utilizadas, y en la Figura 2 se muestran sus posiciones.

Estación	Posición geográfica		H [m]	A [m]	P [años]	I [minutos]
	<i>X</i> [m]	<i>Y</i> [m]				
Cerro Nevado (CN)	271672,59	5460917,50	1837	7	4	360
Cerro El Mocho (CEM)	286312,28	5533812,50	1480	4,5	3	360
La Rinconada (LR)	320144,00	5575114,00	999	82,5-80,5-60-40	1	10
Junín de los Andes (JA)	350794,13	5577549,50	1073	26	1	10
S. C. de Bariloche (SCB)	280500,00	5520000,00	840	10	21	60

Tabla 2. Posición geográfica (m, UTM-19S), elevación (H, m), altura del sensor (A, m), periodo de medición (P, años), intervalo de medición (I, min) de las estaciones meteorológicas analizadas.

El control de calidad realizado a los datos de dirección e intensidad del viento consistió en la identificación de inconsistencias y de pérdidas de registros e incluyó la verificación del rango de validez, el análisis de la persistencia y, cuando fue posible, la corrección del *efecto sombra*, que produce la torre donde están instalados los anemómetros sobre las mediciones de los mismos, dicha corrección se realizó según la metodología sugerida en Mattio y Tilca (2009). A partir de este análisis se obtuvo un 84% de disponibilidad de registros.

La base de datos de San Carlos de Bariloche (SCB) se destacó entre las otras por poseer un período de medición extenso de 21 años otorgándole a los resultados de la simulación características de escala climática.

En la Tabla 3 se resumieron las principales características del viento de las estaciones. Se observa que las direcciones de mayor ocurrencia son el Oeste (270°) y el Oeste-noroeste (300°). La velocidad más débil medida es en Co. El Mocho (CEM) a pesar de que es una estación de altura, esto se debe, por un lado, a que es la que tiene el sensor instalado más cercano al suelo y por lo tanto, las tensiones de corte dentro de la capa límite atmosférica son mayores produciendo desaceleración del flujo. Por otro lado, parte del relieve sumado a la vegetación le producen un efecto de reparo. A pesar de estas características, los datos representan en forma adecuada el clima eólico de la región, por ello se incluyeron en la inicialización del modelo.

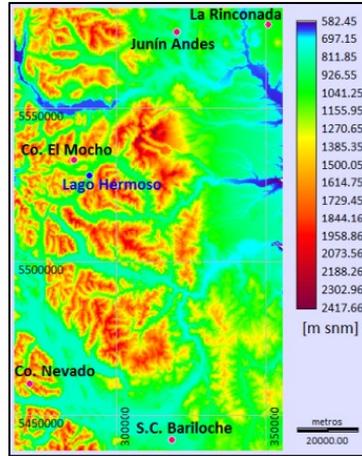


Figura 2. Modelo digital de elevación con la ubicación de las estaciones meteorológicas y del asentamiento Lago Hermoso (proyección UTM-19S, WGS1984). Fuente: Elaboración propia a partir de NASA JPL (2013).

Estación (A(m))	D (°)	Vm (m/s)	Parámetros de Weibull	
			k	C(m/s)
CN (7 m)	270	6,1	1,779	6,919
CEM (4,5 m)	300	1,6	2,316	1,775
LR (40 m)	300	6,2	1,598	6,894
JA (26 m)	270	7,7	1,393	8,387
SCB (10 m)	270-300	5,1	1,672	5,739

Tabla 3: Resumen de las características del viento a la altura del sensor (A, m) en las estaciones meteorológicas (excepción: en La Rinconada que corresponden a 40 m), dirección de viento dominante (D, °), Velocidad media anual del viento (Vm, (m/s), parámetros de la función de Weibull ($f(v)$) (parámetro de forma (k), y de escala, (c , m/s), obtenidos mediante el algoritmo de máxima verosimilitud.

El ajuste a la distribución de la velocidad media anual del viento se realiza mediante la función de densidad de probabilidad de Weibull (Barros, 1986; Labraga, 1994; Palese & Lassig, 1997 y Palese, 1999).

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1)$$

donde v es la velocidad del viento, $f(v)$ es la función de densidad de probabilidad de la velocidad, k es el parámetro de forma y c el parámetro de escala. Es válida para valores de v , k y c mayores a cero. Para hallar los parámetros k y c se utilizó el esquema de máxima verosimilitud (Seguro y Lambert, 2000) porque con éste se logra el mejor ajuste.

La Figura 3 muestra el clima eólico de SCB, La Figura 3a muestra que las direcciones prevalecientes, con más del 40 % de las ocurrencias, son entre 270° y 300° siendo las direcciones Norte y Sur muy poco frecuentes. La Figura 3b muestra la velocidad media anual direccional y se observa que los vientos del sector Nor-noroeste son los más intensos (6,8 m/s). La distribución de frecuencias de velocidades se presenta en la Figura 3c, la línea roja corresponde a $f(v)$ de Weibull. La mayor frecuencia se presenta en intensidades de viento fue alrededor de 2 m/s (20,7 %). Las velocidades superiores a 10 m/s tienen una frecuencia anual de 14,2 %. El mejor ajuste de la $f(v)$ se logra cuando las velocidades son mayores a 5 m/s.

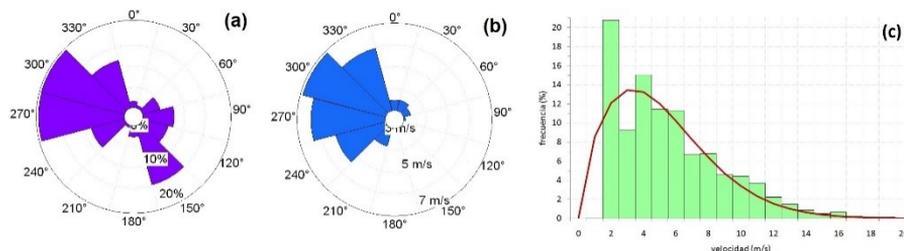


Figura 3. Clima eólico de S. C. de Bariloche (SCB). **(a)** distribución de frecuencias de la dirección del viento; **(b)** velocidad media anual por dirección; **(c)** distribución de frecuencias de la velocidad del viento y $f(v)$ de Weibull

Recurso eólico local.

La valoración del recurso eólico local se realizó con Wind Atlas Analysis and Application Program - WasP - (Troen & Petersen, 1989; Mortensen, Landberg, Troen & Petersen, 1993) que tiene un modelo de microescala y es ampliamente utilizado desde hace décadas. Los datos de distribución ocurrencias de la dirección, de la velocidad media y de la $f(v)$ obtenidos con ArgentinaMap en forma direccional (12 rumbos) en la posición de LH fueron ingresados como datos de entrada en WasP.

El modelo de flujo que utiliza WasP se basa en un modelo teórico desarrollado por Jackson y Hunt (1975) que describe el movimiento del aire dentro de la capa límite atmosférica sobre una pequeña colina bajo condiciones atmosféricas neutras. Se basa en soluciones de ecuaciones simplificadas, donde los efectos no lineales se desprecian, por lo que, se obtienen resultados rápidos, pero menos precisos especialmente cuando la topografía es compleja (Rohatgi & Nelson, 1994).

WasP utiliza el modelo BZ (Bessel expansión on a Zooming grid) de Troen (1990) y una rutina de análisis de mapas para calcular la perturbación del flujo en un punto de observación.

Los datos de entrada son los obtenidos con el modelo de mesoescala. Los datos se corrigen por el efecto de los cambios de rugosidad de la superficie, el efecto de los obstáculos y las variaciones de altura del terreno.

El programa crea lo que se denomina *Atlas Eólico*, que consiste en distribuciones de Weibull que muestran las funciones de densidad de probabilidad de la velocidad

del viento para cada uno de los sectores de dirección, en un grupo alturas sobre el nivel del suelo y longitudes de rugosidad diferentes. Las predicciones se realizan utilizando un factor de aceleración calculado en función de la rugosidad y la topografía (Mortensen et al., 1993). Las características geográficas como la longitud de rugosidad y el relieve se guardan en una estructura de datos vectoriales.

El modelo fue configurado con un dominio rectangular que cubre aproximadamente 10 km alrededor del asentamiento de LH y se observa en la Figura 4. La resolución espacial horizontal se fijó en 50 m (381 x 381 nodos) y la altura a la que se realizan los cálculos en 30 m sobre el nivel del suelo, coincidiendo con la del mapa regional. Los resultados se producen en forma direccional cada 30°.

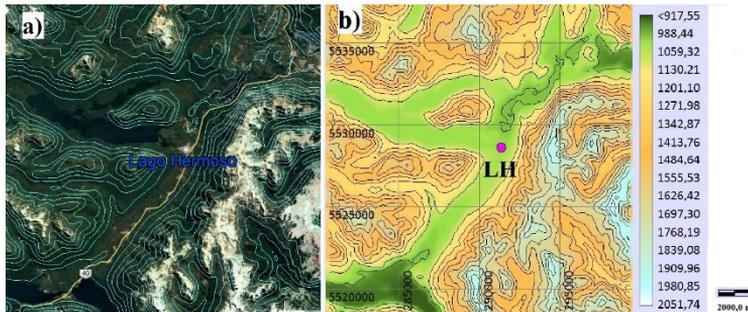


Figura 4. a) imagen Google Earth, para el área del asentamiento Lago Hermoso (LH). b) Modelo digital de elevación usado en WASP (ubicación de LH (punto rosa) (proyección UTM-19S, (NASA JPL, 2013)). y curvas de nivel cada 100 m. Fuente: Imagen Maxtar Technologies, CNES Airbus, Google Earth.

Del análisis se obtiene el mapa de densidad de potencia eólica a partir de (2)

$$DP = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} f(v) v^3 dv \quad (2)$$

donde ρ es la densidad del aire y v es la velocidad del viento a 30 metros de altura.

Resultados

Mapa eólico de mesoescala.

Se obtuvo el potencial eólico regional que permite conocer la distribución de la velocidad media anual y las probabilidades de las velocidades en la zona estudiada a una altura de 30 m sobre el nivel del suelo.

Como se aprecia en la Figura 5, la velocidad media anual del viento está afectada por la topografía dando lugar a efectos locales muy específicos. Las velocidades superiores a 8,0 m/s se ubican en las cumbres, donde las elevaciones del terreno superan 1800 m sobre el nivel del mar, mientras que, los vientos débiles inferiores a 4,0 m/s se dan en los valles que constituyen área protegidas del flujo principal con

alturas del relieve inferior a 700 msnm.

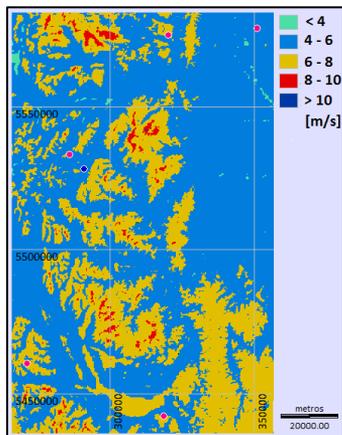


Figura 5. Distribución regional de la velocidad (m/s) media anual a 30 m de altura sobre el nivel del suelo.

El grado de ajuste logrado en la simulación del campo de velocidades fue evaluado comparando las velocidades medidas con las resultantes del modelo a la altura del sensor de cada medición. Se obtuvo un error, calculado como la diferencia relativa, que varía entre 0,03 % y 11,47 %. En la Figura 6 se observa en detalle el error en forma direccionales (12 sectores) de cada una de las series de viento utilizadas en la inicialización del modelo. En Junín de los Andes el modelo sobreestima las velocidades medidas con error mayor a 6 % en el sector Este (15° a 135°). Este hecho se debe a la presencia de un área forestada al este de la estación y distante 400 metros aproximadamente, que se muestra en la Figura 7, que ofrece reparo a los vientos de ese sector produciendo velocidades más débiles que el modelo no pudo capturar en forma precisa.

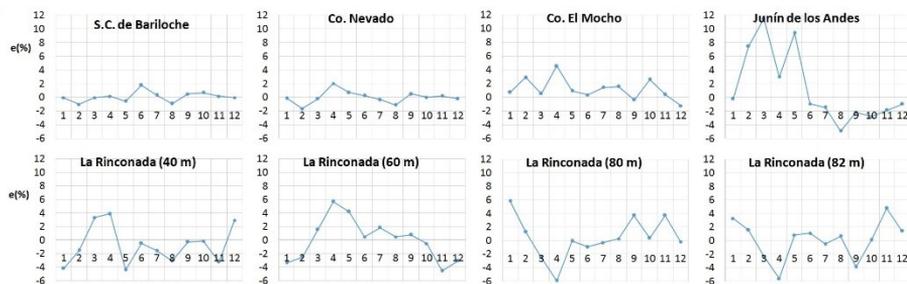


Figura 6. Errores (%) de las estimaciones realizadas por la simulación a la altura de cada sensor. Error porcentual (%) en los sectores de dirección: 1 (0°); 2 (30°); 3 (60°); 4 (90°); 5 (120°); 6 (150°); 7 (180°); 8 (210°); 9 (240°); 10 (270°); 11 (300°) y 12 (330°).



Figura 7. Estación de medición de Junín de los Andes (JA). Imagen Google Earth (06/03/2018). El área recuadrada, corresponde a una forestación. Fuente: CNES/Airbus.

Recurso eólico de microescala.

Los resultados de la simulación del flujo de escala regional evaluados en la posición LH ($X = 291334 \text{ m}$; $Y = 5528669 \text{ m}$) se muestran en la Tabla 4. La velocidad media anual a 30 m de altura es 4,5 m/s, y los parámetros de la función de Weibull son $k = 1,27$ y $c = 4,8 \text{ m/s}$. Las direcciones más frecuentes son 270° y 300° mientras que la dirección con vientos más fuertes es 270° que tienen una velocidad media anual de 7,5 m/s. Por otro lado, la dirección del viento asociada a las velocidades más débiles es el Sur (180°) con 2,5 m/s de promedio anual.

La Figura 8 muestra la $f(v)$ de la velocidad media anual correspondientes a las direcciones de los vientos más fuertes (270°) y más débiles (180°). Se observa que cuando los vientos provienen del sector 180° (165° a 196°) es más probable que ocurran velocidades entre 1 y 3 m/s (75,7 % de frecuencia). Las velocidades superiores a 9 m/s tienen una frecuencia muy baja equivalente a 2 horas en un año.

Los vientos que provienen del sector 270° (255° a 285°) tienen una frecuencia de 47,1 % en el rango de velocidades entre 4 y 8 m/s y vientos intensos mayores a 11 m/s tienen una frecuencia de 16,5 %.

Sectores	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dirección [$^\circ$]	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
f (%)	1,60	0,80	4,40	7,50	6,40	14,80	2,70	0,60	8,30	20,50	20,60	11,90
Vm (m/s)	3,00	4,50	5,10	3,50	2,60	2,60	2,50	2,90	5,70	7,50	6,70	3,70
k	1,81	1,60	1,95	1,74	2,03	1,95	1,91	1,84	1,57	1,94	1,84	1,93
c (m/s)	3,37	5,02	5,75	3,93	2,93	2,93	2,82	3,26	6,35	8,46	7,54	4,17

Tabla 4. Frecuencia media anual (f, %), velocidad media anual de viento (Vm, m/s), parámetro k de Weibull, parámetro c de Weibull (m/s) por dirección en Lago Hermoso (LH).

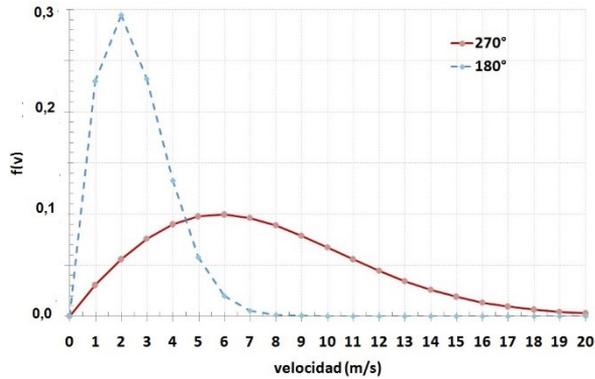


Figura 8. Función de densidad de probabilidad ($f(v)$) de Weibull de los sectores de dirección de menor (180°) y mayor velocidad media anual (270°).

Los valores de la Tabla 4 se utilizaron como datos de entrada al modelo de microescala para la evaluación del potencial eólico del sitio y sus alrededores, junto con los mapas vectoriales de las características geofísicas de lugar. Los resultados del recurso eólico se observan en la Figura 9. En el mapa de la velocidad media anual a 30 m de altura (Figura 9 (a)) pueden apreciarse los efectos locales en la velocidad de viento debidos a la topografía, los valles y cañones tienen velocidades débiles, mientras que, en las zonas altas bien expuestas la velocidad supera 14 m/s.

La densidad de potencia o potencia meteorológica disponible media anual a 30 m sobre el suelo se muestra en la Figura 9 (b), de acuerdo a las clases estándar de densidad de potencia del viento que se presentan en la Tabla 5. Se observa que, si bien hay una amplia zona con potencial eólico extraordinario, este se ubica en las áreas más altas que son de difícil acceso. El valle con dirección Noreste – Sudoeste por donde pasa la Ruta 7 Lagos y donde se ubica el asentamiento tiene en su lado sur excelente potencial eólico.

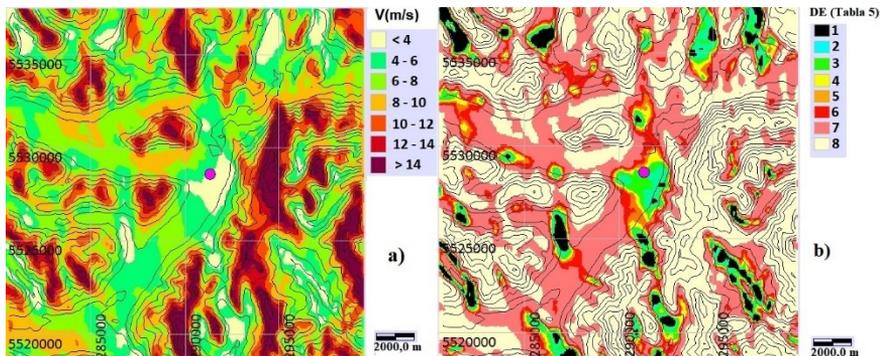


Figura 9. Mapas del potencial eólico medio anual en Lago Hermoso (LH) a 30 m de altura. (a) Velocidad (m/s); (b) Densidad de potencia eólica según Tabla 5.

Clases	1	2	3	4	5	6	7	8
DP (W/m ²)	<160	160–240	240–320	320–400	400–480	480–640	640–1600	> 1600
Potencial	marginal	regular	moderado	bueno	muy bueno	excelente		extraordinario

Tabla 5. Clases de densidad de potencia eólica (DP, W/m²) a 30 m de altura.

Demanda eléctrica.

El mercado actual de aerogeneradores está dominado por las turbinas de eje horizontal de tres palas las cuales transfieren su energía mecánica rotacional a un generador eléctrico. Haciendo un análisis preliminar para determinar si es viable un proyecto de parque eólico se calculó la cantidad de energía eléctrica anual que produciría. Los supuestos utilizados para los cálculos del potencial eólico fueron: dos aerogeneradores de 50 kW de potencia nominal, con rotor de 18 m de diámetro instalado a una altura de 30 m y un rendimiento de 0,35. Bajo estas condiciones hay ubicaciones en el área de estudio que llegarían a una producción de 240,2 MWh/año.

Otro aspecto a considerar es la variabilidad diaria tanto del consumo eléctrico como de la velocidad del viento. Como se ha mencionado, no hay un relevamiento del consumo energético de cada usuario de LH, por esta razón se ha modelado una curva de demanda eléctrica media anual teniendo en cuenta la variación de consumo a lo largo del día. Para ello, se utilizaron datos disponibles de otras comunidades aisladas de la provincia (Argañaraz C., comunicación personal, 2018).

La curva estimada de demanda energética se la comparó con la variación diaria de la velocidad del viento de las estaciones meteorológicas de la región. En la Figura se observa que la curva estimada de demanda energética tiene un máximo a las 21:00 HL (hora local) y un pico secundario a las 09:00 HL. La variación diaria media anual de la velocidad del viento tiene un mínimo a las 06:00 HL en SCB, a las 09:00 HL en LR y a las 10:00 HL en JA; los máximos ocurren a las 17:00, 19:00 y 18:00 HL respectivamente.

Estos resultados evidencian que habría que estudiar con datos medidos del lugar si el pico secundario de demanda eléctrica quedaría abastecido con energía eólica porque ocurre en el horario en que las velocidades tienen los valores mínimos. También, se debería analizar con mediciones cuando se produce el pico máximo de demanda eléctrica porque no necesariamente coincidiría con el de la velocidad del viento y debería estudiarse cómo derivar o restringir la producción de energía, durante los períodos en los que las velocidades son máximas y se presentaría un exceso de energía eólica sin consumo.

Discusión y Conclusiones

La región patagónica presenta buenas condiciones de viento que permiten pensar a la generación eólica como una alternativa viable para el acceso a la energía en comunidades aisladas de los sistemas de transporte de energía eléctrica.

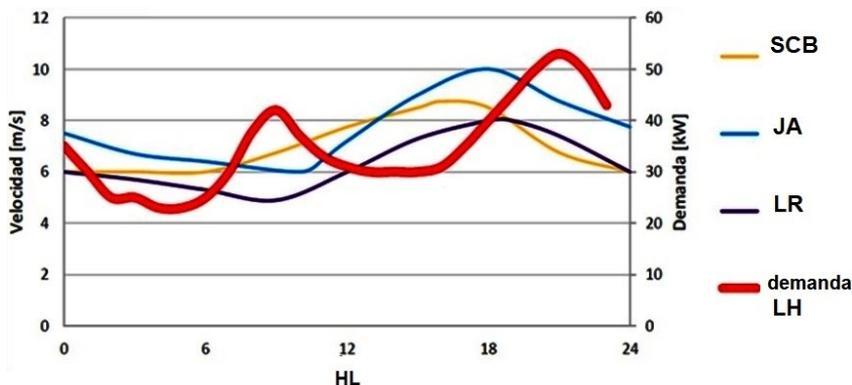


Figura 10. Curva estimada de demanda de energía eléctrica en Lago Hermoso (LH) y curvas de la variabilidad de la velocidad del viento en escala diaria en S. C. de Bariloche (SCB), Junín de los Andes (JA) y La Rinconada (LR).

La técnica de mapeo utilizada en este trabajo tiene algunas limitaciones, la primera es la resolución de los datos del modelo digital de elevación porque ocurren variaciones significativas del terreno dentro del área estudiada, por lo tanto, la estimación del recurso eólico para una celda de la malla en particular (48400 m² en el mapa regional y de 2500 m² en el mapa local) puede no aplicarse a todas las áreas dentro de la celda.

Una segunda limitación se refiere a la capacidad del modelo conceptual del flujo de capturar una variedad de fenómenos de microescala, como por ejemplo: la estructura de los chorros de niveles bajos y su interacción con la capa límite, las circulaciones locales como los flujos montaña - valle y los efectos de canalización en áreas de terreno con pendiente pronunciada.

A pesar las limitaciones enunciadas, se optó por utilizar la metodología del mapeo puesto que en LH no hay mediciones. Las características topográficas impiden la utilización directa de los datos de la estación más cercana que es Co El Mocho (estación de altura), que se encuentra a 7,5 km, debido a que en regiones no planas la variabilidad espacial es muy alta tanto de la velocidad como de la dirección del viento.

En el trabajo se elaboró un mapa eólico regional, a partir de datos medidos en Junín de los Andes (JA), La Rinconada (LR), Co. El Mocho (CEM), Co. Nevado (CN) y San Carlos de Bariloche (SCB), esta última, distante 90 km de LH y se estimaron las características de la velocidad y dirección del viento en el sitio. Los resultados del mapa eólico a escala regional se consideran de adecuada calidad dado que el error promedio cometido considerando todas las estaciones y todas las direcciones fue de 1,95 %.

Las características climáticas del viento obtenidas en LH se ajustaron a lo esperado, los vientos más frecuentes y más intensos son de los sectores 270° y 300°.

En la segunda etapa se elaboró el mapeo del potencial eólico local a 30 m de altura. Hay numerosos sectores con muy buena a extraordinaria calidad de vientos,

por lo tanto, la zona es apta para planear aprovechamientos de la energía eólica.

Se dio un ejemplo de prefactibilidad del aprovechamiento eólico que bajo los supuestos utilizados se llegaría, en algunos sectores, a una producción anual de 240,2 MWh/año que podría satisfacer la demanda estimada de 111,0 MWh/año.

Dado que la demanda de energía eléctrica estimada con la metodología utilizada en este estudio tiene limitantes se hace necesario la implementación de auditorías energéticas o encuestas para la evaluación de las necesidades reales de la población.

Los mapas eólicos obtenidos en este trabajo muestran la importancia de los efectos topográficos sobre las características de viento. A pesar de los buenos resultados obtenidos, como el área tiene un relieve complejo, necesariamente se debe contar con datos anemométricos locales para reducir significativamente la incertidumbre de los resultados de las estimaciones.

Aunque hay sitios cercanos al asentamiento que poseen buena accesibilidad vial y un excelente recurso eólico, el impacto ambiental simbólico que produce la modificación del paisaje por la presencia de los aerogeneradores es un aspecto importante en un lugar turístico y debería ser específicamente evaluado.

Agradecimientos.

Las autoras de este trabajo agradecemos a la Ing. Cecilia M. Argañaraz, del EPEN. Los datos de viento utilizados en el estudio fueron provistos por el Servicio Meteorológico Nacional, el EPEN, la Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los ríos Limay y Neuquén y la Agencia de Desarrollo de Inversiones del Neuquén S.E.P. Este trabajo se realizó con fondos de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Comahue subsidio PI04/I227.

Bibliografía

- Barros, V. R. (1986). *Atlas del Potencial Eólico del Sur Argentino*. Centro Nacional Patagónico Ed.
- Brower M. (1998). *WinMap Program*. Brower & Co., Andover, MA, USA.
- Catuogno, G., Villa, L., Pleitavino, G., Alinei, J. & Catuogno, C. (2020). Open-source hardware technology, a sustainable solution to achieve energy for all in the global south. *Proceedings of VIII International Conference on Sustainable Development (ICSD)*. 8 pp.
- Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE), *Consumo Básico de Electrodomésticos*, Última visita 2018. <https://www.argentina.gov.ar/enre/uso-eficiente-y-seguro/consumo-basico-electrodomesticos>.
- Hualpa, F. & Milani, F. (2007). *Mapa eólico de la Provincia de Mendoza*. Informe Técnico Proyecto J-046, Mendoza: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, 60 pp.
- Jackson, P. S. & Hunt, J. C. (1975). Turbulent wind flow over a low hill. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101, 929-955.

- Kruyt, B., Dujardin, J. & Lehning, M. (2018) Improvement of Wind Power Assessment in Complex Terrain: The Case of COSMO-1 in the Swiss Alps. *Front. Energy Res*, 6:102.
- Labraga, J. (1994). Extreme Winds in the Pampa del Castillo Plateau, Patagonia, Argentina, with reference to wind farm settlement. *Journal of Applied Meteorology*, 33(1), 85-95
- Lamonica, M. (2008). *15 km Global Wind Map at 80 m. Mean Wind Speed for 2005*. 3TIER, Inc. <https://www.cnet.com/news/free-web-map-shows-where-the-wind-blows/>. Última visita 2018.
- Lu, X., McElory, M. B. & Kiviluoma, J. (2009). Global Potential for Wind-Generated Electricity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(27), 10933-10938
- Mattio, H. F. & Tilca, F. (2009). *Recomendaciones para mediciones de velocidad y dirección de viento con fines de generación eléctrica, y medición de potencia eléctrica generada por aerogeneradores*. CREE, INENCO, Ministerio de Planificación Federal Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Energía de la Nación.
- Mortensen, N. G., Landberg, L., Troen, I. & Petersen, E. L. (1993). *Wind Atlas Analysis and Application program (WAsP)*: Vol. 2: User's guide Risø National Laboratory.
- Murthy, K. S. R. & Rahi, O. P. (2017). A comprehensive review of wind resource assessment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 1320-1342.
- NASA JPL (2013). *NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second [Data set]*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2021-12-11 from <https://doi.org/10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1.003>
- Palese, C. & Lassig, J. L., (1997). Lago Mari Menuco. Parte I: Caracterización del Recurso Eólico. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 1 (2), 177-180
- Palese, C. (1999). Vientos Intensos en la Región Norpatagónica. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 3 (2), 140-143
- Pedro, G., Mattio, H. F., Palese, C., Warchomicka, N. & Lassig, J. L. (2006). Recurso eólico de la Provincia del Neuquén. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 10, 6.15 – 6.21.
- Potts, J. R., Pierson, S. W., Maticen, P. P., Harnel, J. R. & Babau, V.C. (2001). Wind energy resource assessment of western and central Massachusetts. *Proceedings of American Institute of Aeronautics and Astronautics*, AIAA-2001-0060, 11pág.
- Rohatgi, J. & Nelson, V. (1994). *Wind Characteristics: An analysis for the generation of wind power*. Alternative Energy Institute.
- Seguro, J. V. & Lambert, T. W. (2000). Modern Estimation of the Parameters of the Weibull Wind Speed Distribution for Wind Energy Analysis, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85, 75-84
- Troen, I. & Petersen, E. L. (1989). *European Wind Atlas*. Risø National Laboratory, Roskilde.

Troen, I. (1990). A high-resolution model for flow in complex terrain. *Proceedings of the AMS Ninth Symposium on Turbulence and Diffusion*, Roskilde, Denmark, 417-420.

Troncoso Schenker, S. D., Ferreyra, L. y Palese, C. (2018). Actualización de la cartografía eólica en el centro y sur de Neuquén. *Boletín geográfico*, 40 (2), 95 – 109.