

# POTENCIAL DE HIDRÓGENO A PARTIR DE RECURSOS EÓLICOS EN LA ZONA CENTRAL DE ARGENTINA: PROVINCIAS DE SAN LUIS, CÓRDOBA, LA PAMPA Y BUENOS AIRES

Villarroel Sáez P.<sup>(1)</sup>, Rodríguez C.R.<sup>(2)</sup>, Leiva E.P.M.<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 299, CP5010, Córdoba, Argentina, [patricia.villarroel.s@gmail.com](mailto:patricia.villarroel.s@gmail.com)

<sup>(2)</sup> Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 299, CP5010, Córdoba, Argentina, [ramiro246@gmail.com](mailto:ramiro246@gmail.com)

<sup>(3)</sup> INFIQC, Departamento de Matemática y Física, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Nacional de Córdoba, Haya de la Torre s/n, CP5010, Córdoba Argentina, [leiva@fcq.unc.edu.ar](mailto:leiva@fcq.unc.edu.ar)

**RESUMEN:** En este trabajo se presenta la evaluación del costo de producción de hidrógeno electrolítico producido con energía eólica. Se evalúan zonas de factor de capacidad (FC) > 35%, en la región centro del país. Dicha evaluación se llevó a cabo determinando la energía anual disponible en cada provincia estudiada, utilizando la información contenida en el mapa eólico nacional y con ella el costo de producción de la energía eólica mediante el software RETScreen. El objetivo de esta evaluación fue establecer el costo de producción de hidrógeno, basado en el costo obtenido de la energía eólica necesaria para la electrólisis del agua. Para esta evaluación se utilizó el programa H2A. Se estableció una relación entre las zonas, su FC y el costo de producción de hidrógeno, resultando que a mayor FC, menor costo de producción de hidrógeno. Buenos Aires y Córdoba resultaron las provincias más convenientes para la producción de hidrógeno.

**Palabras clave:** Economía del hidrógeno. Producción hidrógeno/eólica. Energías Renovables.

## INTRODUCCIÓN

La actual crisis energética mundial pone sobre la mesa la discusión la necesidad de diversificación de la matriz energética en el país para el mediano y largo plazo, con miras a la utilización de fuentes renovables de energía limpia y tecnologías que permitan mantener un suministro sostenible y sustentable. Para desarrollar este objetivo, es de interés fundamental el análisis de los recursos disponibles localmente, para el adecuado aprovechamiento energético de los mismos.

Un recurso renovable, que a su vez es fuente de energía limpia y sustentable, lo constituye el viento. El conocimiento de su velocidad y distribución de probabilidad, aportan información relevante para el aprovechamiento de la energía eólica, que por su naturaleza intermitente presenta dificultades para un suministro continuo; en el caso de utilizarse para la generación de electricidad. Sin embargo, una forma ventajosa de superar estas dificultades es el empleo de vectores energéticos de almacenamiento, que permitan disponer de la energía producida en un determinado tiempo y lugar para su posterior utilización.

Este es el caso del vector energético hidrógeno, utilizado como combustible y producido vía electrólisis de agua, con electricidad de origen eólico (Menzl, *et al.*, 1998; Spinadel, 2004). Por ello, el análisis del recurso eólico para producir el vector energético hidrógeno en zonas donde éste se encuentra disponible, impulsa la visión de una matriz energética más diversa y posibilita los primeros pasos hacia una naciente economía del hidrógeno en el país.

Este trabajo incluye un análisis del recurso eólico en una zona no típicamente estudiada por sus fuertes vientos, como es el caso de la Patagonia, sino que se enfoca en provincias de la zona centro del país, buscando precisamente descubrir un nicho energético aprovechable. Las provincias estudiadas fueron: Córdoba, San Luis, La Pampa y Buenos Aires. En este contexto se ofrece una estimación de los órdenes de magnitud de los costos que involucra la producción de hidrógeno vía electrólisis de agua. De este modo, en un escenario favorable, se podrán instalar los equipamientos adecuados para realizar la medición del recurso eólico en un sitio determinado, cuya utilización se estime adecuada y/o necesaria, teniendo en cuenta que 1 kg de hidrógeno se corresponde energéticamente con aprox. 4 litros de combustible líquido (H. A. Peretti, 2004).

## METODOLOGÍA

*Evaluación del Recurso Eólico en las Provincias Estudiadas.*

La información sobre velocidades medias del viento es una aproximación para conocer el valor esperado de su distribución de probabilidad y evaluar el recurso de un sitio determinado. En Argentina continental, más del 70% del territorio tiene velocidades medias anuales (medidas a 50 m de altura sobre el suelo) superiores a los 6 m/s y constituyen zonas de muy baja densidad de población, unas 10 veces menor que EEUU o Europa (CADER, 2009). Si bien las zonas de mayor factor de capacidad eólico (FC eólico) están en la Patagonia, existen zonas del centro del país que presentan factores de capacidad iguales o superiores al 35% (a 70 m de altura sobre el suelo).

Entre los años 2005 y 2007 en Argentina, el Centro Regional de Energía Eólica (CREE) desarrolló un Mapa Eólico Nacional, que contiene información relevante respecto a la velocidad media anual, frecuencia de distribución y densidad de potencia del viento en todo el territorio, en base a 10 años de registros meteorológicos provenientes del SMN combinados con modelos digitales de topografía, de rugosidad y relevamientos específicos. Esta información se procesó junto con registros de vientos de otras fuentes y trabajos sobre imágenes satelitales proporcionadas por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de EEUU, para luego volcar este Mapa Eólico en un Sistema de Información Geográfico (SIG Eólico), el cual ha sido utilizado en este trabajo para elaborar un diagnóstico de las provincias estudiadas, con expectativas de aprovechamiento del recurso eólico para la producción de hidrógeno vía electrólisis de agua.

Mediante este SIG Eólico se han caracterizado para cada provincia estudiada las áreas equipotenciales, esto es, las que presentan igual densidad de potencia eólica ( $W/m^2$ ), representadas en la Figura 1a; distribución de probabilidad de velocidades medias y parámetros de forma y escala de esta función (distribución de Weibull). Con ello se efectúa el cálculo de la energía anual disponible por área, en base a un aerogenerador comercial de curva de potencia conocida. Las áreas equipotenciales se multiplican luego por la energía eólica calculada.

Como primer criterio de análisis, se seleccionaron las áreas de cada provincia estudiada que presentan un factor de capacidad eólico superior al 35%, representado para todo el territorio continental en la Figura 1b. En segundo lugar, se descartan las áreas naturales protegidas, tanto nacionales como provinciales (ANP) y finalmente se descartan aquellas zonas de pendientes superiores al 20%, ya que estos terrenos son inadecuados para la instalación de parques eólicos. Esta selección de áreas se realizó con la utilización del programa Global Mapper, el cual permite descargar paquetes de información satelital, incorporar mapas georreferenciados y superponerlos. En este caso, se superpusieron los límites provinciales, el mapa de  $FC > 35\%$ , las densidades de potencia eólica y la topografía, para el descarte de las zonas protegidas y de pendientes mayores al 20%. Al mismo tiempo este programa permite medir las áreas equipotenciales seleccionadas para el posterior cálculo de la energía eólica que se puede generar allí.

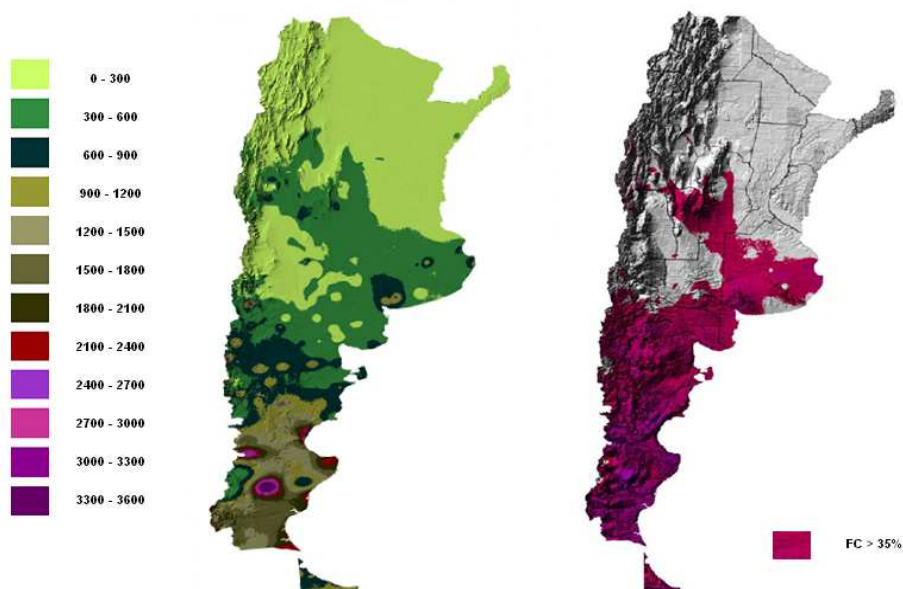


Figura 1a. Densidades de Potencia Eólica entre 0 y 3.600 [ $W/m^2$ ]. Figura 1b. FC Eólico  $> 35\%$  (a 70 m).

#### Cálculo de la Energía Anual por Área.

Para evaluar cuánto viento está disponible para su aprovechamiento en términos energéticos, se define una función acumulada conocida como Factor de Capacidad Eólico, FC. El FC eólico es un valor porcentual de la energía que un aerogenerador puede producir, durante todo un año, en relación a la cantidad de energía que podría entregar una turbina trabajando el 100% del tiempo a su capacidad nominal. Esta última información se obtiene de las especificaciones técnicas del fabricante del aerogenerador a utilizar en las evaluaciones, mientras que la energía anual producida en un área determinada se obtiene mediante la integración matemática entre la función de distribución de probabilidad de las velocidades y la función matemática que describe la curva de potencia del aerogenerador (Crespo *et al*, 2003).

A lo largo de décadas de estudios sobre las velocidades de los vientos y su distribución, se ha logrado caracterizar con bastante éxito su comportamiento, en cuanto que los datos medidos en diversos sitios se ajustan bien al modelo de distribución de Weibull, función similar a la distribución normal, pero sesgada en cierta medida hacia valores inferiores a la media. La función de distribución (de dos parámetros) de Weibull,  $f(u)$ , se describe en la Ecuación 1, donde  $u$  es la velocidad del viento en m/s,  $c$  (m/s) se denomina parámetro de escala y  $k$  es el parámetro de forma que varía típicamente entre 1,5 y 3,0 (adimensional). Cuando el valor del parámetro  $k$  es igual a 2, la función se denomina Distribución de Rayleigh y también se utiliza en casos de estimaciones eólica.

$$f(u) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right) \quad (1)$$

La energía que puede obtenerse anualmente en sitio,  $E_{anual}$ , se calcula con la Ecuación 2, donde  $N_0$  es el número de horas en un año (8.765);  $P(u)$  es la función de potencia del aerogenerador utilizado y  $f(u)$  es la función de distribución de velocidades de viento de Weibull (Barote *et al.*, 2008). La integración se realiza entre los límites de velocidad del viento en los que el aerogenerador es operativo (velocidades de cut-in y cut-out).

$$E_{anual} = N_0 \cdot \int_{u=u_{in}}^{u=u_{out}} P(u) \cdot f(u) du \quad (2)$$

Para la estimación de la energía producida por cada área equipotencial seleccionada, se usó la función o curva de potencia de un aerogenerador BONUS A/S de 2MW y 60 m de altura de eje (con 76 m de diámetro de pala), suponiendo una densidad de 2,5 turbinas por kilómetro cuadrado (Ivy *et al.*, 2005). Así, mediante la Ecuación 3, se obtiene para cada área equipotencial medida con ayuda del programa Global Mapper, la cantidad de energía eólica disponible para producir hidrógeno electrolítico.

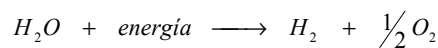
$$E(A_i) = E_{anual}^i \cdot A_i \cdot 2,5 \quad (3)$$

De esta manera, la energía eólica anual disponible para producir hidrógeno vía electrólisis en cada provincia estudiada, está dada por la Ecuación 4, donde el índice de la sumatoria corresponde a las áreas equipotenciales de dicha provincia.

$$E_{provincia} = \sum_{i=1}^n E_{A_i} \quad (4)$$

#### *Requerimientos de energía eólica para producir hidrógeno vía electrólisis de agua.*

El hidrógeno de alta pureza se produce vía electrólisis de agua mediante el paso de electricidad a través de dos electrodos en una solución acuosa o mediante una membrana, siendo la única vía práctica para producir combustible a partir de fuentes renovables de energía (Schroeder, 2007). En este proceso, la molécula de agua se divide para producir oxígeno gaseoso en el ánodo e hidrógeno gaseoso en el cátodo, mediante la siguiente reacción (Chialvo, 2004):



La reacción de electrólisis del agua es opuesta a la de su formación, la cual libera energía. El calor de formación del agua líquida o energía liberada en su formación, a 25°C y 1 atm, es 39 kWh/kg de hidrógeno. Este valor corresponde al poder calorífico superior (HHV en inglés) del hidrógeno. Por lo tanto, el HHV del hidrógeno corresponde a la cantidad de energía teórica necesaria para producir hidrógeno vía electrólisis, esto es, en condiciones ideales de 100% de eficiencia del sistema electrolizador, sin considerar ninguna pérdida de energía (Ivy, J. 2004).

De esta manera, a partir de los resultados de la evaluación del recurso eólico en las provincias estudiadas, se estableció su relación en cuanto a energía disponible para la producción anual de hidrógeno, teniendo en cuenta distintas eficiencias de sistemas electrolizadores. Se tomó como referencia electrolizadores comerciales que funcionan adecuadamente en un rango de eficiencias de 55% a 75%. Un sistema electrolizador comercial eficiente (75%) consume del orden de 52 kWh/kg de hidrógeno (Ivy, J. 2004).

#### *Cálculo del Costo de Producción del Vector Energético Hidrógeno.*

Para estimar el orden de magnitud del costo de producción de hidrógeno vía electrólisis alimentada con electricidad eólica, se toma como referencia el costo neto de la energía eléctrica de origen eólico, necesaria para impulsar la reacción de electrólisis del agua. No se consideran los costos de almacenamiento y distribución. Es así como en una primera etapa, se plantea un estudio de prefactibilidad para un proyecto de parque eólico, modelado para determinar el costo umbral del MWh eólico con el cual se producirá hidrógeno. Posteriormente, se relaciona el costo de la electricidad eólica con la cantidad de electricidad requerida para la producción de hidrógeno, vía electrólisis de agua, para distintas eficiencias del electrolizador.

*Proyecto Eólico Modelado para determinar el costo del MWh eólico.*

Debido a que el costo del MWh generado depende de cuánta energía eólica se produzca, tanto el análisis de costos como el análisis financiero de un parque eólico están estrechamente ligados al FC en cada sitio. Para relacionar entonces el costo del MWh al FC, se utilizó un programa de evaluación de proyectos de energía limpia que incorpora en los cálculos dichos parámetros. Este programa es el software de uso libre RETScreen, cuyo modelo corre en planillas de cálculo Excel de Microsoft, permite hacer análisis preliminares de factibilidad, entre otros. Las etapas de análisis que se utilizaron bajo este modelo fueron: (1) Modelo de Energía; (2) Análisis de Costos y (3) Análisis Financiero. Los parámetros utilizados en los cálculos se muestran en la Tabla 1. La información no detallada corresponde a la sugerida por defecto (estándar) según el modelo aplicado para este tipo proyecto (Clean Energy Project Analysis, 2005).

Parámetros	Supuestos
<b>Parámetros del Modelo de Energía:</b>	
Capacidad del Parque Eólico	60 MW – 30 aerogeneradores de 2MW
Modelo de Aerogenerador	BONUS A/S de 2MW – 60 m
Factor de Capacidad (rango analizado)	35% - 55%
<b>Parámetros de Costos:</b>	
Costo de la turbina	1.300 \$/kW instalado
Costos iniciales totales	\$110.411.729
Costos anuales O&M	\$2.750.891
<b>Parámetros Financieros:</b>	
Tasa de incremento del costo de combustibles	3%
Tasa de Descuento	18%
Tasa de Inflación	18%
Tasa de incremento de la exportación a la red	18%
Tasa de Interés de la Deuda	18%
Tasa de exportación a la red	60 \$/MWh
Vida del Proyecto	25 años
Porcentaje de Deuda	100%
Plazo de la deuda	25 años

Tabla 1. Parámetros utilizados en las corridas del programa RETScreen para el análisis de un parque eólico modelado.

El resultado de RETScreen comparado con datos monitoreados de un mismo sistema, calcula la producción de energía utilizando los datos anuales con una precisión comparable con simulaciones horarias (subestimación 8% a 10%), con la ventaja de requerir sólo 1 valor de datos, versus 8.760 para modelos de simulación horaria como HOMER. Los parámetros de rentabilidad utilizados para evaluar el proyecto son el VAN y la TIR, y además el modelo estima el costo umbral del MWh eólico al cual se puede producir, con rentabilidad neutra del proyecto (VAN = 0). Repitiendo el análisis para distintos FC eólicos, se obtiene una relación entre el incremento del mismo y el costo de la energía. Por consiguiente, el costo de la electricidad eólica (afectado por el FC) tendrá a su vez un efecto observable sobre el costo de la producción de hidrógeno electrolítico. Todos los valores monetarios son expresados en dólares estadounidenses (\$).

*Estimación del costo del kg de hidrógeno.*

A partir del costo de producción de la energía eólica para distintos factores de capacidad, y los requerimientos de energía de los electrolizadores comerciales, se determinó el costo de la producción de hidrógeno, considerando distintas eficiencias energéticas. Este análisis se realizó con el programa H2A Analysis del departamento de energía de Estados Unidos (DOE), diseñado para evaluar proyectos de producción central de hidrógeno. El modelo corre bajo las herramientas de cálculo de Excel de Microsoft, utilizando parámetros clave en el proceso que se muestran en la Tabla 2. Los parámetros no incluidos en esta tabla son los mismos que los sugeridos y utilizados por Ivy Levene *et al.* (2005).

Parámetros	Supuestos
<b>Parámetros de Proceso:</b>	
Materia Prima	Agua
Tipo de Electricidad	Electricidad Industrial
Tecnología de conversión	Electrólisis Alcalina
Modelo y Fabricante Electrolizador	Norsk Atmospheric Type No.5040 (5150 Amp DC)
Capacidad de producción del sistema	52.300 kg/día
Factor de Capacidad (FC)	97%
Pureza del hidrógeno producido	99,9%
Consumo de electricidad del proceso (según eficiencias)	45 – 60 kWh/kg de hidrógeno
<b>Parámetros Financieros:</b>	
Costo del MWh	Resultantes del análisis con RETScreen
Financiación de Capital	100%
Tasa de inflación	5%
Período de Análisis del proyecto	40 años
Vida útil del sistema electrolizador	10 años
Costo Terreno necesario (5 acres = 20234.28 m <sup>2</sup> )	\$1.750

Tabla 2. Parámetros Utilizados en el modelo H2A para Evaluación de Proyectos de Producción de Hidrógeno Electrolítico.

### Caracterización del potencial de hidrógeno de las provincias estudiadas.

Se asocian las zonas de mejor FC Eólico (mayor producción de energía anual por área) a un menor costo de producción de hidrógeno vía electrólisis de agua, estableciendo un nicho energético en provincias donde el recurso eólico es bastante aprovechable.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Evaluación del Recurso Eólico en las Provincias Estudiadas.

Mediante el SIG Eólico fue posible estimar el potencial de energía eólica presente en cada una de las provincias estudiadas, simulando el funcionamiento de aerogeneradores a 60, 80 y 100 m de altura sobre el suelo. En el gráfico de la Figura 2 se puede observar la diferencia de magnitudes de generación de energía absoluta y específica anual: la primera, contabilizando todas las áreas de FC > 35% de cada provincia estudiada, y la segunda, dividiendo el primer valor por el área disponible para emplazamientos eólicos en cada una de ellas. Se observa claramente cómo aumenta el potencial eólico con la altura de los aerogeneradores instalados de igual capacidad nominal.

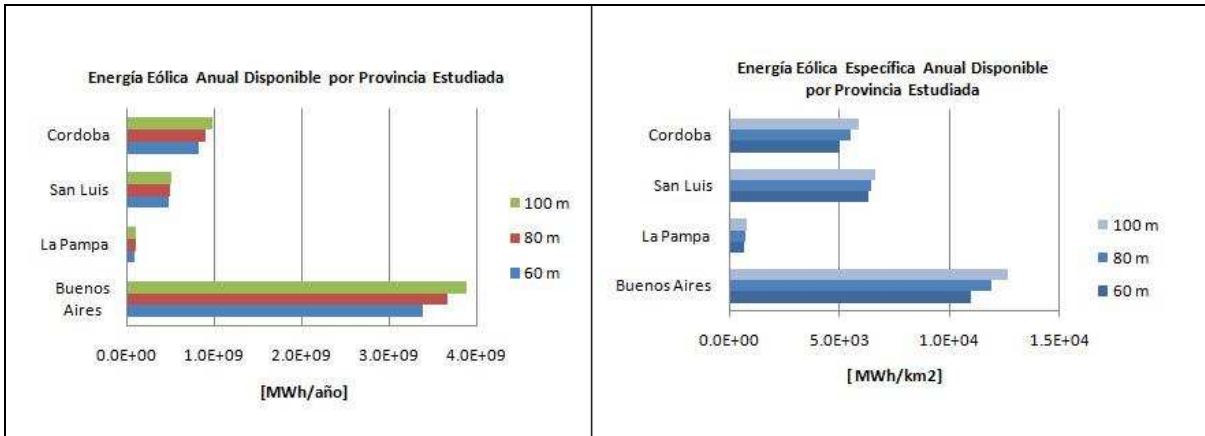


Figura 2. Potencial eólico por provincia anual y por áreas estudiadas a distintas alturas sobre el suelo.

### Costos de la Energía para Producción de Hidrógeno.

El costo del MWh eólico se calculó utilizando el programa RETScreen, el cual, en base a un modelo de parque eólico de 60 MW propuesto, calcula los parámetros financieros VAN y TIR para que el proyecto energético sea rentable para un inversionista. Del mismo modo, calcula el costo umbral del MWh eólico generado al cual el VAN es cero y la TIR se iguala a la tasa de descuento utilizada (18%). Con los valores umbrales del MWh obtenidos mediante RETScreen, asociados cada uno a un FC eólico, se calcularon los costos del kg de hidrógeno electrolítico con el modelo H2A, estableciendo un orden de magnitud de costos asociados a la disponibilidad del recurso eólico. Debido a que 1 kg de hidrógeno equivale energéticamente con ca. 4 lt de combustible líquido (para el transporte o calefacción), y éste a su vez se encuentra en el orden de magnitud de costos de \$1 por litro, para que el hidrógeno pueda ser competitivo, el orden de magnitud de su costo debe rondar los 4\$/kg, por lo que el costo de la electricidad de origen eólico que se utilizará en la electrólisis no debe sobrepasar los 38 \$/MWh para una eficiencia de electrolizador de 65%; 43,9 \$/MWh para una eficiencia de 75% y 49,8\$/MWh para un 85% de eficiencia del electrolizador. Estos valores se desprenden de las curvas de costos de la Figura 3.

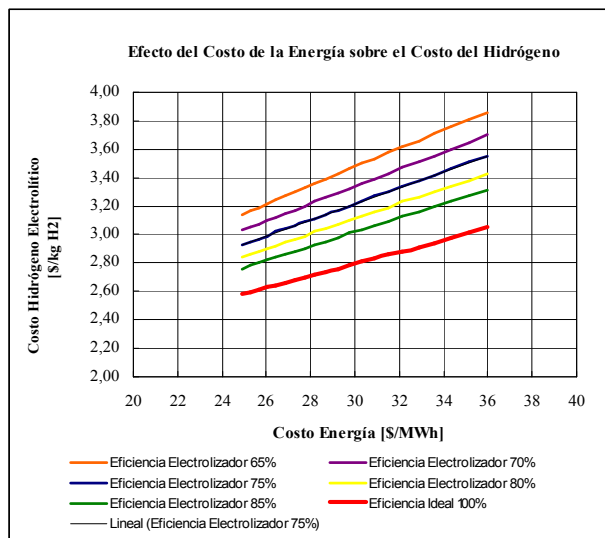


Figura 3. Efecto del costo de la Energía Eólica sobre el costo de la producción de hidrógeno electrolítico.

Las zonas que presentan mejor FC eólico tienen asociado a ellas un menor costo de producción de hidrógeno electrolítico. Gracias a la información otorgada por el SIG Eólico, es posible identificar las áreas donde se puede invertir en un parque eólico, que aproveche la intermitencia del recurso primario en la producción del vector energético hidrógeno como forma de almacenamiento. A continuación se presentan en la Tabla 3 las evaluaciones del costo de producción de energía eólica e hidrógeno electrolítico para distintos FC y eficiencias de electrolizadores comerciales.

RETSscreen®		H2A Analysis [\$/kgH2]					
		60 kWh/kgH2	55,7 kWh/kgH2	52 kWh/kgH2	48,8 kWh/kgH2	45,9 kWh/kgH2	39 kWh/kgH2
FC [%]	[\$/MWh]	65%	70%	75%	80%	85%	100%
35	35,97	3,86	3,7	3,55	3,43	3,31	3,05
36	35,14	3,81	3,65	3,51	3,38	3,27	3,01
37	34,31	3,76	3,6	3,46	3,34	3,23	2,98
38	33,58	3,71	3,55	3,42	3,3	3,2	2,94
39	32,87	3,66	3,51	3,38	3,26	3,16	2,91
40	32,16	3,62	3,47	3,34	3,23	3,13	2,88
41	31,54	3,58	3,43	3,3	3,19	3,09	2,86
42	30,87	3,53	3,39	3,27	3,16	3,06	2,83
43	30,32	3,5	3,36	3,23	3,13	3,03	2,81
44	29,75	3,46	3,32	3,2	3,1	3,01	2,78
45	29,22	3,43	3,29	3,17	3,07	2,98	2,76
46	28,7	3,39	3,26	3,14	3,04	2,95	2,74
47	28,18	3,36	3,23	3,11	3,02	2,93	2,72
48	27,72	3,33	3,2	3,09	2,99	2,9	2,7
49	27,29	3,3	3,17	3,06	2,97	2,88	2,68
50	26,84	3,27	3,15	3,04	2,95	2,86	2,66
51	26,43	3,24	3,12	3,02	2,92	2,84	2,64
52	26,01	3,22	3,1	2,99	2,9	2,82	2,63
53	25,64	3,19	3,07	2,97	2,88	2,8	2,61
54	25,27	3,17	3,05	2,95	2,86	2,78	2,59
55	24,89	3,14	3,03	2,93	2,84	2,76	2,58

Tabla 3. Costos de Generación de Energía Eólica y de Producción de Hidrógeno Electrolítico (en dólares).

De esta manera, el costo del hidrógeno para una zona tipo de las provincias del centro del país estudiadas con un FC Eólico de 35% y un sistema electrolizador, bastante eficiente, de un 75% de eficiencia energética, alcanza los 3,55 \$/kg, valor que se encuentra dentro del orden de magnitud esperado para ser competitivo con un combustible líquido para transporte o calefacción. Se destaca que en este estudio, no se ha considerado el costo de la distribución y transporte de hidrógeno, desde la planta hasta los centros de consumo.

#### Potencial de Producción de Hidrógeno

En la Figura 4 se muestra la producción de hidrógeno teórica esperada para las provincias estudiadas, considerando las evaluaciones eólicas con aerogeneradores a distintas alturas de eje (60, 80 y 100 m), tomando un electrolizador con un 75% de eficiencia. El potencial específico señala que producción se puede alcanzar por área, información relevante para la instalación de parques eólicos que suministren electricidad para la producción de hidrógeno electrolítico.

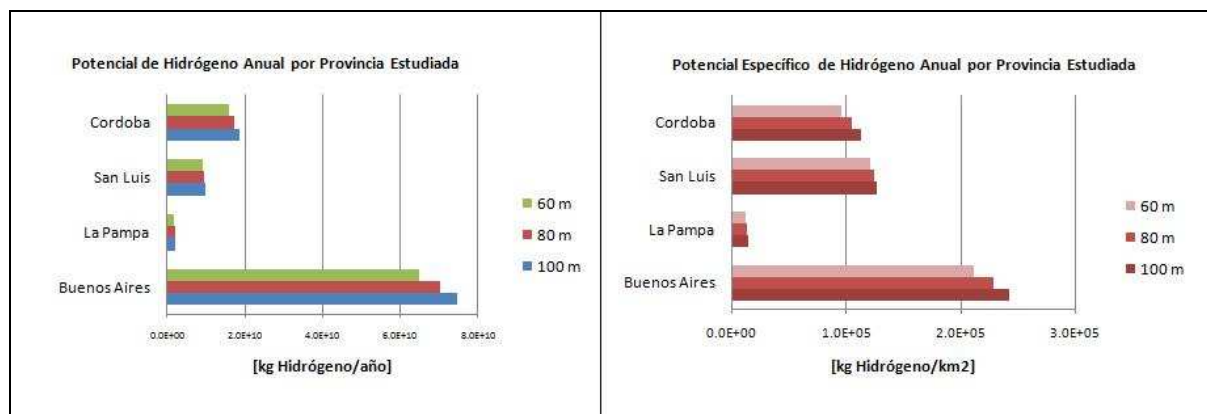


Figura 4. Potencial de Producción de Hidrógeno vía electrólisis con electricidad de origen eólico.

#### Costo del Hidrógeno en función del costo de la electricidad eólica

Mediante el cálculo del costo del hidrógeno en base al costo de la electricidad de origen eólico, el cual a su vez depende fuertemente del FC, se puede establecer una relación entre las áreas de cada provincia que tienen un factor de capacidad determinado y la repercusión en el costo de producción de hidrógeno para esa zona. En la Figura 5 se muestra gráficamente las proporciones de las áreas de cada provincia estudiada que se corresponden con un costo específico de producción de hidrógeno-eólico, vía electrólisis de agua. Las áreas no aprovechables se refieren a las descartadas según los criterios establecidos, ya mencionados.

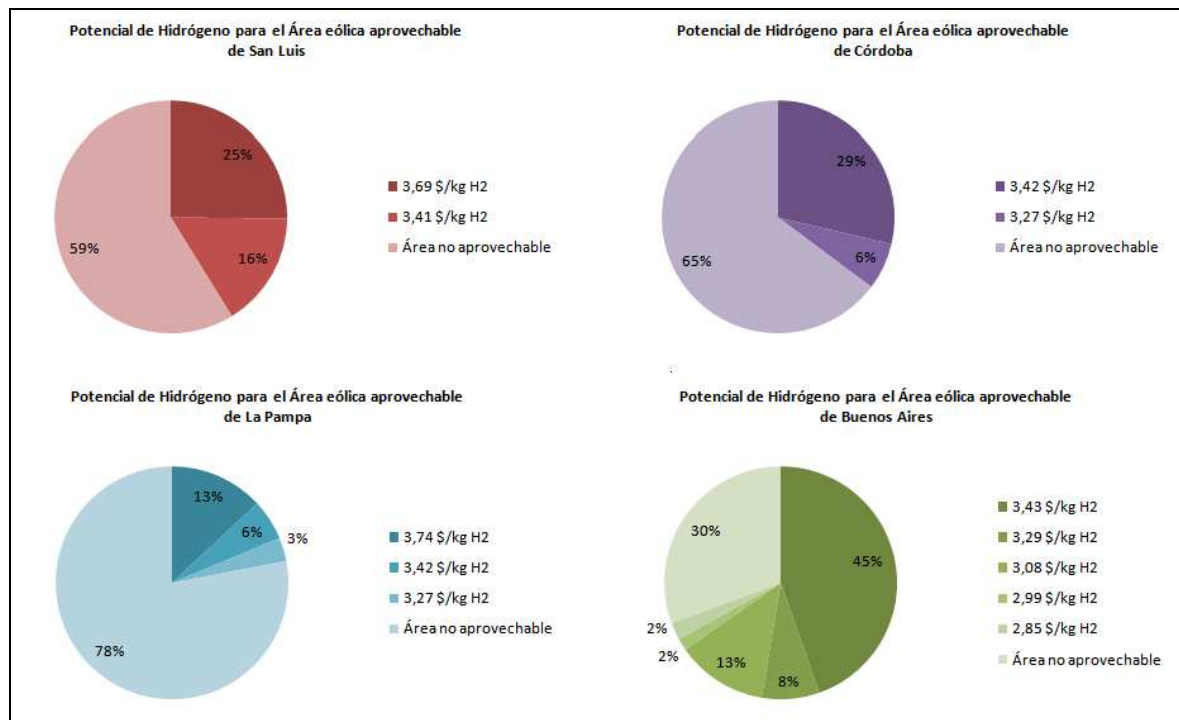


Figura 5. Potencial de Producción de Hidrógeno por Área en términos de Costo del kg de Hidrógeno.

## CONCLUSIONES

Se describió en este trabajo una metodología para la evaluación del costo de producción electrolítica de hidrógeno-eólico. Se utilizaron programas de uso libre en cada una de las etapas, cuyos modelos corren con herramientas de las planillas de cálculo de Excel. Se pudo evaluar la potencialidad eólica de las provincias del centro de la República, en todas aquellas zonas cuyo factor de capacidad eólico es superior al 35%. En cada una de estas etapas, se consideró la eficiencia correspondiente del convertidor de energía.

Del análisis realizado para la potencialidad eólica de cada provincia estudiada, reflejado en la energía anual producida, resultó que Buenos Aires presenta el valor máximo, que es un orden de magnitud superior a la siguiente, que es Córdoba. En el caso de la primera, este resultado se asocia, a través del SIG eólico, a la calidad del recurso presente en la amplia zona costera. En el caso de Córdoba, a la evidencia de un corredor eólico presente en la zona suroeste de la provincia (Rodríguez *et al.*, 2011).

De lo anteriormente expuesto se desprende entonces que las zonas con mayor potencia eólica aprovechable (mayor FC) podrán producir hidrógeno a un costo más conveniente, altamente competitivo y con ello, impulsar el desarrollo de una economía del hidrógeno localmente, para satisfacer aplicaciones diversas como calefacción, transporte, industria, entre otras. La identificación de estas zonas y la estimación de su Potencial de Hidrógeno constituyen una herramienta de gran importancia para quienes participan en la toma de decisiones respecto a las necesidades energéticas y la utilización sustentable de los recursos de cada zona del país.

## REFERENCIAS

- Barote L., Negrea I. Wind energy probability estimation using Weibull distribution function. Annals of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume VII (XVII), 2008.
- Cámara Argentina de Energías Renovables. CADER. Estado de la Industria Eólica en Argentina (2009).
- Chialvo A. C. Hidrógeno y la Energía del Futuro (2004). Academia Nacional de Cs. E. F. y N. y Academia Nacional de Ingeniería. Serie de publicaciones científicas N° 1.
- Clean Energy Project Analysis (2005). RETScreen® Engineering & Cases Textbook. 3<sup>rd</sup> Edition. © Minister of Natural Resources Canada 2001-2005.
- Crespo A., Migoya E., Gómez Elvira R., Veganzones C. (2003). Energías Renovables para el Desarrollo. Editorial Thomson. Global Mapper web page, disponible en: <http://www.globalmapper.com>
- H2A Analysis webpage (2009), [http://www.hydrogen.energy.gov/h2a\\_analysis.html](http://www.hydrogen.energy.gov/h2a_analysis.html)
- Ivy, J. Summary of Electrolytic Hydrogen Production (2004). Milestone Completion Report. National Renewable Energy Laboratory. U.S. Department of Energy.
- Ivy Levene J., M.K. Mann, R. Margolis, A. Milbrandt, report for the ISES 2005 Solar World Congress Orlando, Florida August 6-12, 2005, disponible en <http://www.osti.gov/bridge>.
- Mapa Eólico Nacional (CREE), disponible en: <http://www.sigeolico.com.a>

- Menzl F., Wenzke M., Lehmann J. Hydrogen Production by windmill Powered Electrolyser (1998). Proceeding of the 12<sup>th</sup> World Hydrogen Energy Conference. Bs. As. Argentina. Vol. 1.
- Peretti, H. A. capítulo “Materiales innovativos para almacenamiento de hidrógeno en aplicaciones móviles”, en el libro “Hidrógeno y la Energía del Futuro”, eds. R. A. Dubois, R. P. J. Perazzo, W. E. Triaca, ANCEFN, Serie de Publicaciones Científicas Nro 1, 2004.
- RETScreen® International. Análisis de Proyectos de Energía Limpia. © Minister of Natural Resources Canada 2001 – 2006.
- Schroeder, Chip. Hydrogen from Electrolysis. Chapter 8. The Hydrogen Energy Transition. Moving Toward the Post Petroleum. Age in Transportation 2004, P. 121. Available online 16 July 2007.
- Rodríguez C.R., Riso M., Jeandrevin G. y Leiva E.P.M. (2011). Análisis del potencial de generación eléctrica en el corredor eólico sur de la provincia de Córdoba. Hyfusen 2011.
- Spinadel E. Hidrógeno y la Energía del Futuro (2004). Academia Nacional de Cs. E. F. y N. y Academia Nacional de Ingeniería. Serie de publicaciones científicas N° 1.

**ABSTRACT:** We present in this work the cost evaluation for electrolytic hydrogen production from wind energy. Zones with Capacity Factor (CF) > 35% are evaluated in the central region of the country. Using information from the national wind map, the annual energy production was characterized for each province. The energy production cost was obtained using RETScreen software. Based on this cost and the energy necessary for water electrolysis, the next objective was to determinate the production cost for electrolytic hydrogen using H2A program. A relationship among zones, CF and hydrogen production cost was established. As a result bigger CF implies lower hydrogen production cost. From this analysis the most convenient provinces for hydrogen production turned out to be Buenos Aires and Córdoba.

**Keywords:** Hydrogen Economy. Hydrogen/wind production. Renewable Energy.