

# Platform for the Optimization of Distributed Energy and Simulation of the Green Hydrogen Value Chain, Chile A Case Study

Y. Masip, *Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Full Professor Escuela de Ingeniería Mecánica, Valparaíso, Chile*, S. M. Nuñez, *Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Associate Professor Escuela de Ingeniería Química*, and A. Fernandez, *PhD Texas State University*.

**Abstract--** This work presents an innovative web application designed to support decision-making, facilitating the identification of suitable sites for green hydrogen production using solar and wind energy. The main objective is to boost the development of the green hydrogen value chain, providing a valuable tool for both public and private decision-makers and interested communities to determine sustainable locations for the plant, thus promoting sustainable regional development. The methodology is based on an approach that integrates essential requirements and characteristics identified in previous studies and relevant socio-environmental and technical parameters. Technical aspects are crucial to assess the feasibility of installing green hydrogen plants, while socio-environmental ones, such as proximity to ecologically sensitive areas or indigenous communities, may impose restrictions. The system uses a multi-criteria decision-making approach, allowing users to weigh these parameters according to the project's needs. The case study used was Chile, offering an interactive visualization of key hydrogen generation indicators throughout the country. This system opens new possibilities for the planning and implementing green hydrogen infrastructures, with potential for application in other regions of the world.

**Index Terms—**Green hydrogen; Renewable energy sources; Decision support systems; Web application; Optimization.

## I. INTRODUCTION

LA mitigación del cambio climático requiere urgentemente una reducción en la intensidad de carbono en los sistemas energéticos, un problema que está íntimamente relacionado con la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera [1]. A medida que la población mundial ha crecido, también lo ha hecho la demanda de recursos naturales, lo que ha provocado un aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub>. Estas crecientes concentraciones de GEI pueden rastrearse hasta la Revolución Industrial, iniciada en 1750, cuando la quema de combustibles fósiles, como el carbón y el petróleo, se convirtió en la principal fuente de energía, especialmente en los sectores industrial, de transporte y generación eléctrica [2]. Para 2021, el sector energético se había consolidado como el mayor contribuyente global a las emisiones de GEI, representando el 77% del total, ya que los combustibles fósiles aún cubren el 81% de la demanda energética mundial [3][4].

Las energías eólica y solar fotovoltaica son tecnologías esenciales para lograr una reducción en las emisiones. Chile

tiene una notable ventaja en el campo de las energías renovables, con un potencial eléctrico estimado recientemente en 2.153 gigavatios (GW), lo que equivale a 76 veces la capacidad eléctrica instalada en 2021, asumiendo que todo el territorio pudiera ser utilizado para proyectos energéticos [5]. Según el ranking Climatescope 2020 de Bloomberg New Energy Finance, Chile es uno de los líderes, junto a Brasil, Uruguay, Costa Rica, México y Colombia, en energía renovable en América Latina, gracias al aumento en la inversión para proyectos de energías renovables no convencionales (ERNC), que pasó de 1.300 millones de dólares en 2014 a 3.200 millones de dólares en 2015 [6]. El país cuenta con un significativo potencial eólico, particularmente en las regiones noreste y sureste, y en la región de Magallanes y la Antártica Chilena, donde se estima un potencial eólico de 126.000 MW, cuatro veces mayor que la capacidad combinada del sistema eléctrico nacional y los sistemas de energía de Aysén y Magallanes [7]. Además, Chile ha experimentado un notable crecimiento en la capacidad solar fotovoltaica, especialmente desde 2016, siendo el Desierto de Atacama en el norte del país el lugar con la mayor irradiación solar a nivel mundial [8].

La producción de hidrógeno verde (GH<sub>2</sub>) se perfila como una tecnología prometedora para la transición energética, utilizando fuentes de energía renovable no convencionales (URES) como la eólica y solar para generar hidrógeno. Esta tecnología se considera una opción viable para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y disminuir las emisiones de GEI [9]. Chile tiene una ventaja competitiva en la producción de GH<sub>2</sub>, con costos de producción que se proyectan entre los más bajos a nivel mundial para 2023 [10]. Esto posiciona al país como un actor clave en el emergente mercado global de energía renovable.

La transición energética en Chile presenta una oportunidad única para abordar desafíos socioambientales mediante soluciones innovadoras. Las políticas propuestas por el gobierno chileno y el Ministerio de Energía hacen necesaria la evaluación del potencial de hidrógeno en el país. Con el aumento en el número de plantas de hidrógeno, es esencial investigar las ubicaciones más adecuadas y el potencial energético de estas infraestructuras. Parámetros ambientales y técnicos, como la proximidad a salares, comunidades indígenas, y el potencial solar y eólico de las regiones, deben ser

considerados en la planificación de la industria del GH<sub>2</sub>. En este contexto, un sistema de apoyo a la toma de decisiones (DSS) puede ser una herramienta crucial para el gobierno, la industria y los planificadores, ayudando a identificar y comparar posibles ubicaciones y escenarios para el desarrollo de industrias de GH<sub>2</sub>. Este estudio presenta un innovador sistema DSS basado en la web, diseñado para determinar las ubicaciones óptimas para la producción de hidrógeno verde en Chile, integrando datos nacionales de 16 parámetros (8 ambientales y 8 técnicos) y presentando los resultados en un mapa interactivo que muestra el potencial de hidrógeno a lo largo de las 16 regiones del país.

## II. METODOLOGÍA

Esta metodología se divide en dos ítems principales: (i) la recopilación y análisis de datos e información relacionada con el contexto territorial, y (ii) la identificación y evaluación de parámetros desde las perspectivas técnica y socioambiental (ver Fig. 1). La primera parte se enfoca en identificar los parámetros técnicos que facilitan el acceso a la infraestructura, como la red vial y las subestaciones eléctricas. Por otro lado, la dimensión socioambiental considera parámetros relevantes para la conservación y el desarrollo humano, tales como áreas ambientalmente importantes con valor social. Estas partes establecen las bases y las fórmulas matemáticas necesarias para evaluar la viabilidad de la instalación de plantas de GH<sub>2</sub> y para calcular el potencial de generación de hidrógeno verde a partir de energía solar y eólica, ayudando así a los tomadores de decisiones a identificar posibles restricciones para la instalación de estas plantas.

### A. Datos

Se utilizó el procedimiento algorítmico, planteado por [11], permitiendo clasificar y jerarquizar de zonas del caso de estudio (Chile), las cuales son definidas geográficamente por polígonos con coordenadas específicas de longitud y latitud. Este enfoque permite determinar la idoneidad de instalar industrias de GH<sub>2</sub> en zonas particulares.

Los datos sobre las zonas y terrenos disponible se obtuvieron de diferentes rasters disponibles de acceso abierto [12-15] como parte de información geoespacial, reales que han sido licitadas. Cada zona se clasifica con un identificador, un nombre que describe su ubicación geográfica, y su geometría correspondiente (longitud y latitud de los vértices del polígono o polígonos múltiples). El norte de Chile, que recibe una de las mayores cantidades de radiación solar en el mundo (hasta 11 kWh/m<sup>2</sup> por día [16]), es ideal para la instalación de plantas solares. Aunque esta alta disponibilidad energética podría usarse directamente para abastecer ciudades o industrias, existen desafíos relacionados con la infraestructura eléctrica. En el extremo sur de Chile, donde los vientos son fuertes, el área es adecuada para la instalación de plantas de energía eólica. Cabe destacar que los resultados del algoritmo tienden a favorecer la energía solar, ya que la mayoría de las tierras disponibles se encuentran en el norte del país y esta energía posee un menor costo nivelado respecto a la eólica.

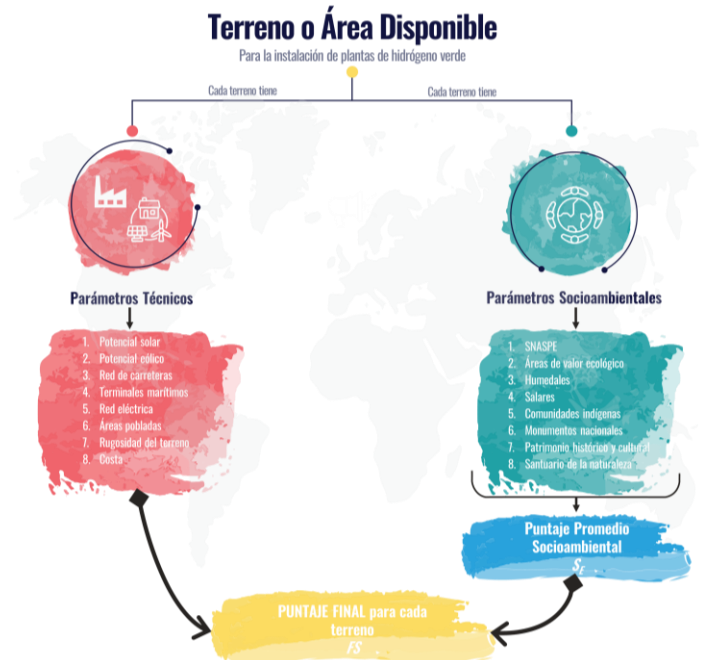


Fig. 1 Esquema metodológico del cálculo de puntajes ambientales promedio y finales aplicados a un terreno a la vez: cada terreno tiene sus propios puntajes de SE y FS. Basado en [11].

El algoritmo es adaptable a diferentes contextos geográficos y puede aplicarse independientemente de la distribución de las tierras. Los ejemplos, mostrados por [11] para tierras propiedad del gobierno ilustran casos reales y demuestran la efectividad del algoritmo en generar calificaciones y clasificaciones de las tierras. El método descrito aquí permite aplicarse a cualquier terreno dentro de Chile, en tierra firme, sin cruzar fronteras internacionales.

### B. Parámetros Socio-ambientales y Técnicos

La identificación y evaluación de parámetros ambientales y técnicos son cruciales para determinar la viabilidad de la instalación de plantas de hidrógeno verde (ver Fig. 1). Fuentes de datos de acceso abierto, entre las que se destaca, normativas nacionales e internacionales, estudios de la literatura científica especializada, proyectos introducidos al Sistema de Evaluación Ambiental (SEA), entre otras. Para ello, se utilizaron herramientas de procesamiento geoespacial, como QGIS.

**Parámetros socioambientales:** Estos parámetros son fundamentales para la conservación y el desarrollo humano, abarcando áreas ambientales con valor social, identificadas a través de ocho criterios (ver Tabla I, columna 1).

**Parámetros técnicos:** Estos parámetros facilitan o restringen el acceso a la infraestructura, y se identifican también a través de ocho criterios técnicos (ver Tabla I, columna 2).

### C. Formulación utilizando un enfoque de toma de decisiones multicriterio (MCDM)

Se empleó una ecuación específica para transformar los parámetros socioambientales (por ejemplo, la distancia a áreas prioritarias de alto valor de conservación o a salares chilenos) en puntajes, bajo la premisa de que una mayor distancia se traduce en un mejor puntaje.

TABLA I  
CATEGORÍAS CONSIDERADAS PARA LOS PARÁMETROS SOCIOAMBIENTALES Y TÉCNICOS

Socio-ambiental	Técnicas
Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado y Conservación Local y Ambiental	Distancia a la costa
Áreas con Valor Ecológico	Rugosidad del terreno
Zonas de humedales	Distancia de la red vial
Salares	Potencial solar
Comunidades indígenas	Potencial eólico
Patrimonio histórico y cultural	Distancia terminal marítima cultural
Monumento nacional	Distancia de la red eléctrica
Santuario de la naturaleza	Distancia áreas pobladas

$P_k(d_{t,i}) = 10 \tanh\left(\frac{d_{t,i}}{k}\right)$ , si el terreno se encuentra fuera de una zona  $M$ , de lo contrario 0.

$$N_{M,t} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 P_k(d_{t,i}) = \text{Avg}(P_k(d_{t,1}), \dots, P_k(d_{t,8})) \quad (1)$$

donde  $t$ : terreno,  $d_{t,i}$ : distancia entre terreno  $i$  y  $t$ ,  $P_k(d_{t,i})$ : puntuación asociada a la distancia  $d_{t,i}$ .

La fórmula de puntuación difiere para los parámetros técnicos debido a las diferentes escalas y unidades. En este caso, no hay promedio de puntuaciones técnicas:

$$P_k(d_{t,i}) = 10e^{-\frac{d_{t,i}}{k}}; P_k(d_{t,i}) = \tanh\left(\frac{d_{t,i}}{k}\right) \text{ (para solar y viento)}$$

$$P_k(d_{t,9}), \dots, P_k(d_{t,15}), N_{T,t,i} = P_k(d_{t,i}), \forall i \in \{9, \dots, 15\} \quad (2)$$

Puntuación final:

$$FS = p_1 N_{M,t} + \sum_{i=9}^{15} p_i N_{T,t,i}, \text{ donde } p_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (3)$$

donde  $w_i$ : peso, and  $p_i$ : porcentaje.

La Fig. 2 muestra la función de puntuación para los parámetros socioambientales, mientras que la Fig. 3 ilustra la función de puntuación para los parámetros técnicos. Ambas figuras permiten determinar cómo la distancia afecta la puntuación, indicando que una menor distancia resulta en una peor puntuación, mientras que una mayor distancia conlleva una mejor puntuación. Es decir, el tema radica en que estar muy cerca de una zona que representan temas socio-ambientales, susceptibles de un conflicto socio-ambiental, mientras más alejado se encuentre la planta de producción de GH<sub>2</sub> de esa zona

o área mejor puntuación tiene ese terreno para la producción de GH<sub>2</sub>. En cambio, para algunas de las variables Técnicas sucede lo contrario, lo que se desea es estar más cerca de lo puntos de interés, como es la red vial, terminal marítimo, distancia de la red eléctrica y distancia a la costa. En cambio, para la variable técnica, distancia a áreas pobladas mientras más alejado se está de estas zonas mayor es el puntaje con vistas a evitar el conflicto que pueda surgir con estas poblaciones.

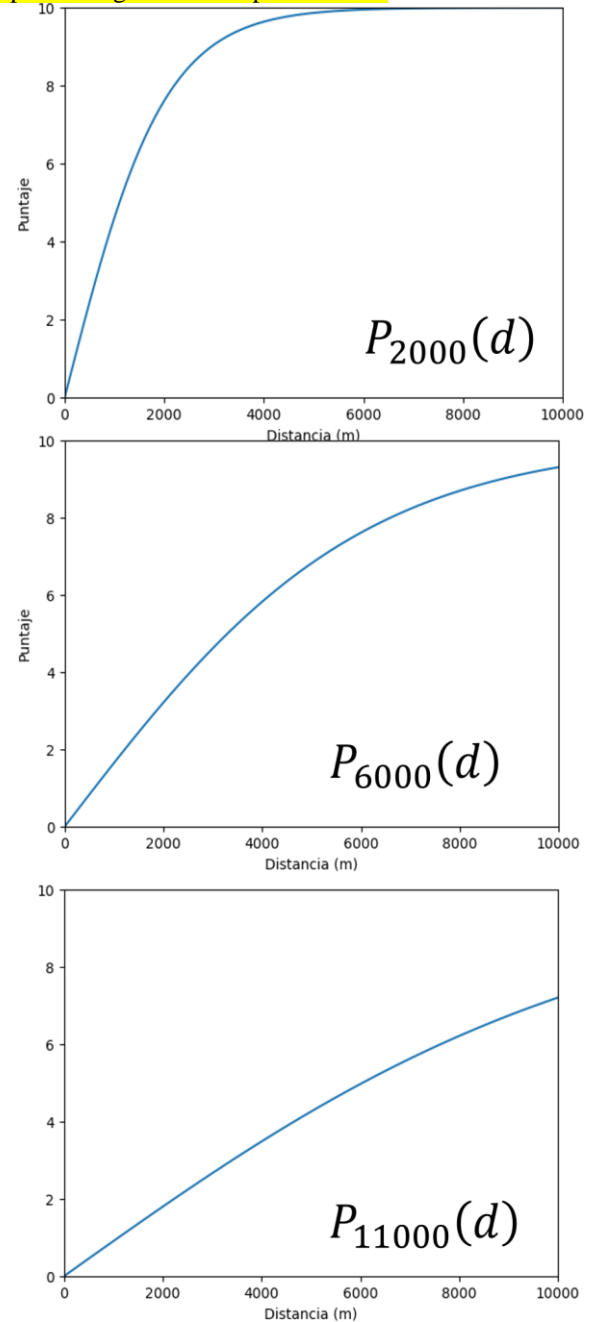


Fig. 2. Función de puntuación que transforma los parámetros socioambientales (distancias) en puntajes. Esta función está delimitada entre 0 y 10. Una mayor distancia se traduce en un puntaje más alto. Consulte la Ecuación (1).

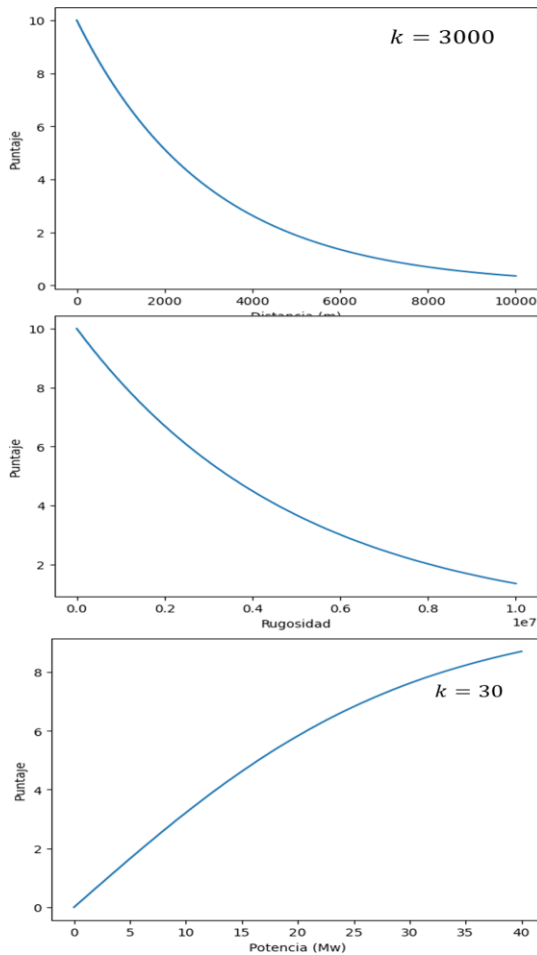


Fig. 3. Función de puntuación para la proximidad a la costa y la menor rugosidad del terreno (ver Ecuación (2)), así como para el mayor potencial de energía eólica/solar (ver Ecuación (3)). Esta función convierte las distancias (en metros) de estos parámetros a una escala que va de 0 a 10.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Todas las zonas, tales como salares y costas, fueron representadas geoméricamente como polígonos definidos por coordenadas geográficas (latitud y longitud) (ver Fig. 4). Se implementaron diversos algoritmos con el objetivo de simplificar los cálculos y disminuir el tiempo computacional requerido para calcular las distancias entre las zonas públicas y estos objetos geoméricos. Inicialmente, las distancias entre dos puntos se definieron como una línea geodésica trazada entre ambos puntos en una superficie aproximada de la Tierra, utilizando el Sistema Geodésico Mundial WGS84.

#### A. Capacidad de toma de decisiones multicriterio

En el centro del DSS se encuentra una herramienta de toma de decisiones multicriterio que permite a los usuarios ponderar diversos parámetros según las necesidades específicas del proyecto o las prioridades estratégicas. Esta funcionalidad facilita un proceso de evaluación adaptable, donde los responsables pueden dar mayor peso a ciertos criterios, como reducir el impacto ambiental o maximizar la eficiencia energética. El sistema ajusta automáticamente las clasificaciones de los sitios potenciales en función de estas

preferencias, generando un resultado personalizado que esté alineado con los objetivos del proyecto.

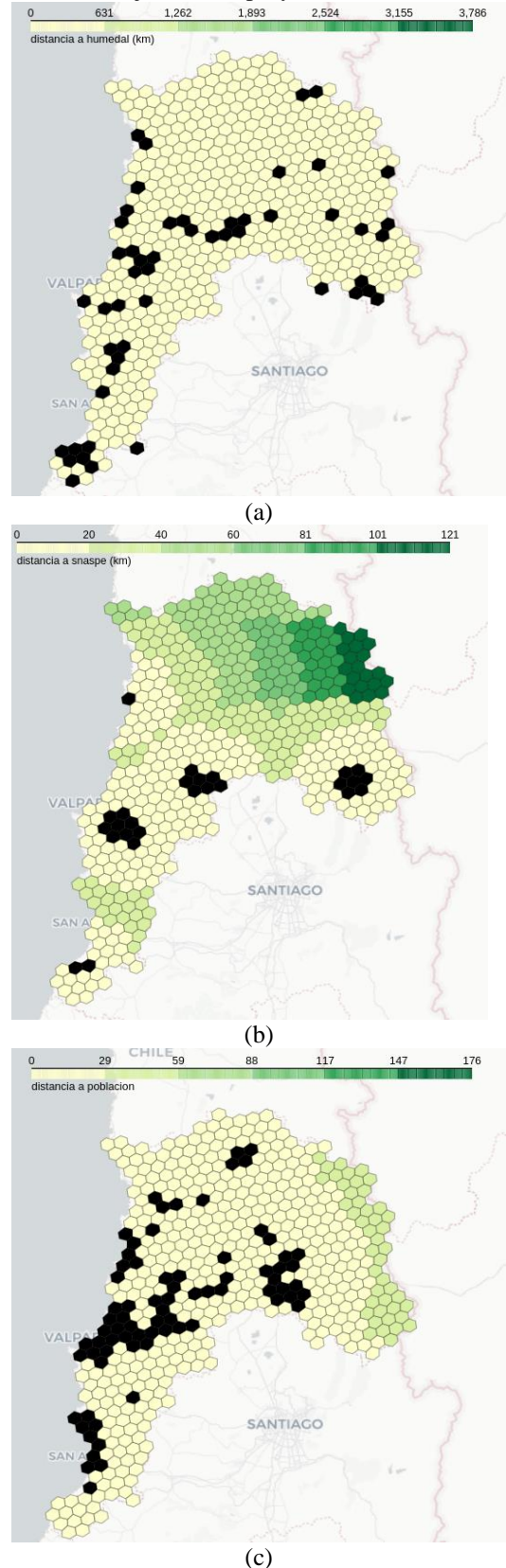


Fig. 4. Ejemplo de visualización de diferentes parámetros por separado: (a) Distancia a Zonas de Humedales, (b) Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE), y (c) Distancia a Zonas Pobladas.

Atendiendo a esto, se realiza un proceso de teselación (visualizado como hexágonos) en todas las regiones del caso de estudio: Chile, con una resolución de 25 km<sup>2</sup>. Seguido, se efectúa un cálculo de las puntuaciones en función de los parámetros mencionados anteriormente generando una base de datos con los resultados finales para cada hexágono. Los valores determinados se centraron en la producción de kilogramos de hidrógeno verde (kgH<sub>2</sub>) utilizando fuentes de energía solar y eólica (ver Fig. 5).

públicos como privados. El desarrollo de este producto está respaldado por la teselación de las regiones de Chile, permitiendo la selección de regiones a nivel comunal o regional, e incorporando controles que permiten ajustar la ponderación de los parámetros socioambientales o técnicos mediante deslizadores (sliders), lo que refleja la importancia asignada a cada factor (ver Fig. 6). Finalmente, cada hexágono visualizado puede proporcionar información energética centrada en la producción de hidrógeno verde.

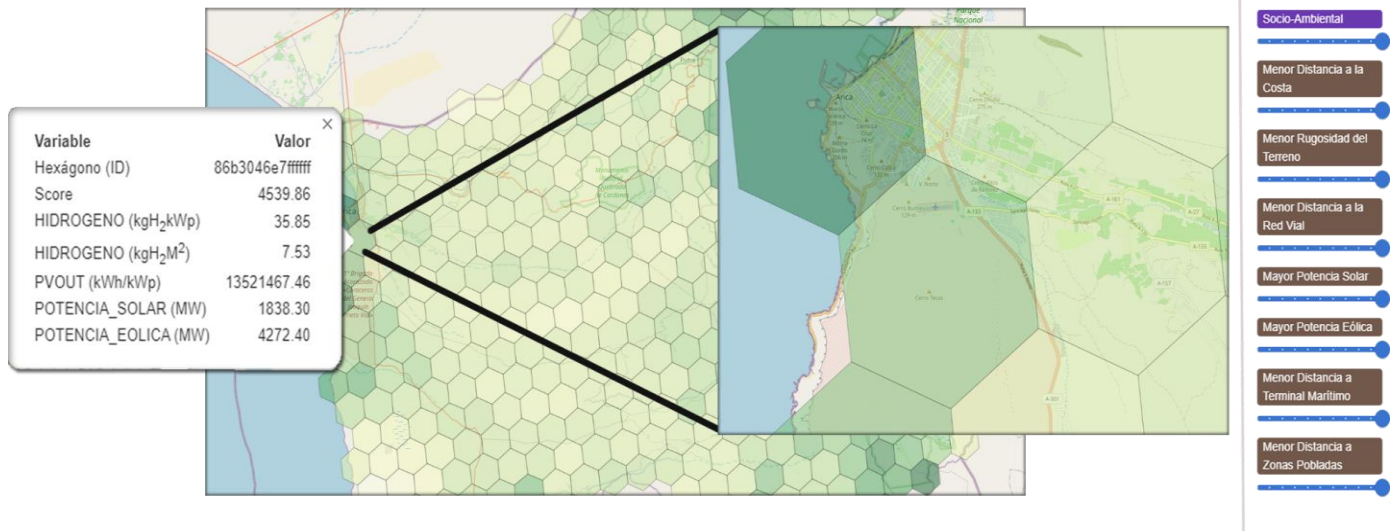


Fig. 5. Visualización de una zona teselada e información energética en la región de Arica y Parinacota. Se usaron los parámetros socioambientales y técnicos con la ponderación máxima de las puntuaciones.

Los parámetros y modelos fueron integrados en una plataforma web interactiva, que actúa como un sistema de apoyo a la toma de decisiones (DSS), con el propósito de apoyar a los responsables de la toma de decisiones, tanto para sectores

Este DSS incorpora de manera eficiente datos geográficos sobre la disponibilidad de energía solar y eólica en diversas regiones de Chile. Al utilizar automáticamente el potencial de energía solar y eólica en cada área considerada, el sistema ofrece una visualización clara de las ubicaciones más

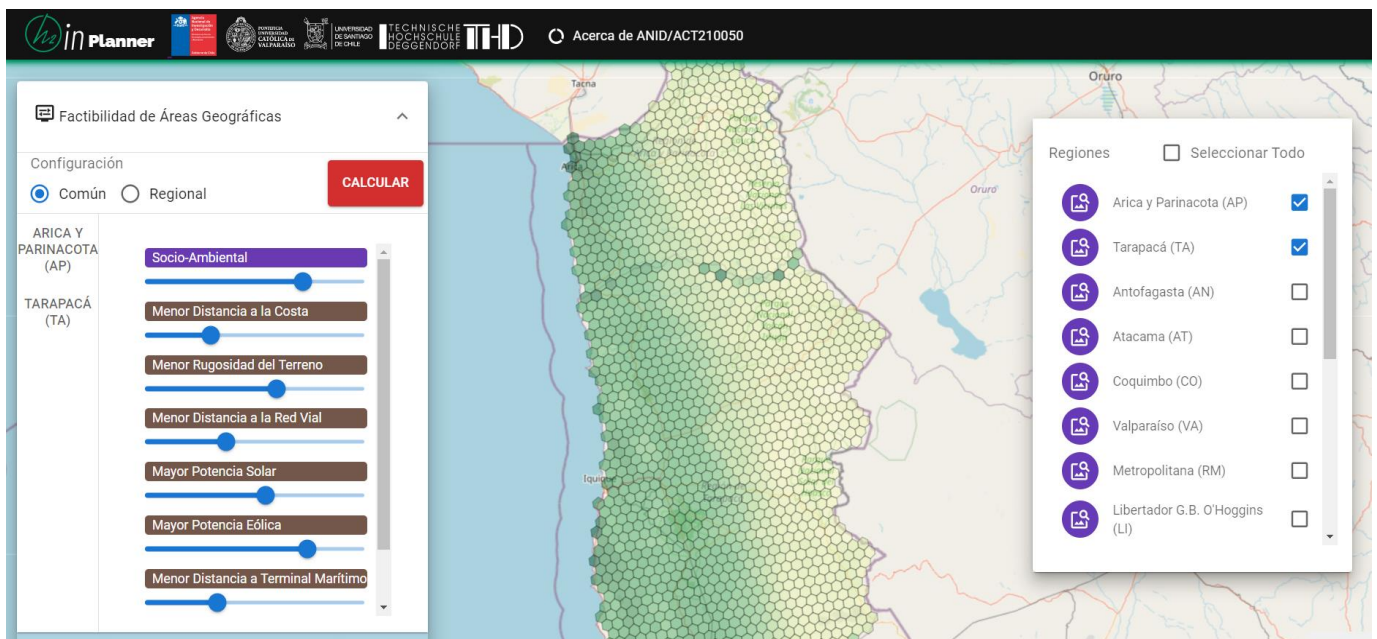


Fig. 6. Módulo para la viabilidad de áreas geográficas. Este ejemplo visualiza factores (menú izquierdo) para dos regiones (menú derecho).

prometedoras para la instalación de plantas de hidrógeno verde. Esta característica permite a los tomadores de decisiones identificar rápidamente las regiones del norte como óptimas para la producción de hidrógeno basado en energía solar, y las áreas del sur como ideales para proyectos basados en energía eólica, optimizando así el uso de fuentes de energía renovables.

#### IV. CONCLUSIONES

Se evaluó el potencial de producción de hidrógeno verde en el caso de estudio basado en parámetro socioambientales y técnico. La aplicación web desarrollada incorpora una arquitectura integral de sistema y un modelo de datos, permitiendo la gestión de escenarios regionales en Chile, así como la visualización y manejo de datos geospaciales reales. Además, se diseñó y sistematizó una metodología de toma de decisiones multicriterio que contempla los parámetros socioambientales y técnicos, facilitando la identificación de las ubicaciones más adecuadas para la instalación de industrias de hidrógeno verde, específicamente generados para el caso de estudio: Chile. Este producto facilita la implementación de estrategias innovadoras a través del uso de información específicamente adaptada al contexto chileno, con la posibilidad de aplicar esta metodología a otras regiones o países. También ofrece evaluaciones integrales para enfrentar desafíos en la viabilidad de las plantas de hidrógeno verde, contribuyendo potencialmente a la planificación gubernamental en torno al hidrógeno.

#### V. AGRADECIMIENTOS

Los investigadores agradecen sinceramente el apoyo financiero de este estudio proporcionado por el Proyecto Fondecyt Regular 2024 N°1241401 financiado por ANID y el Proyecto ANID ACT210050.

#### VI. REFERENCES

##### *Periodicals:*

- [1] Y. Widiyawati, «Global warming & climate change: Integration of socio-scientific issues to enhance scientific literacy», J. Phys. Conf. Ser., vol. 1511, n.o 1, Art. n.o 1, 2020.
- [2] O. US EPA, «Sources of Greenhouse Gas Emissions [Overviews and Factsheets]», U.S. Environmental Protection Agency, Technical report., 2015. [En línea]. Disponible en: <<https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>>
- [3] N. García, «Carbono neutralidad en el sector energético de Chile», Biblioteca del Congreso Nacional de Chile | Asesoría Técnica Parlamentaria, Technical report., 2021. [En línea]. Disponible en: <[https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32578/1/BCN\\_Carbononeutralidad\\_en\\_el\\_sector\\_energetico\\_Chile\\_15Oct\\_Rev\\_RT01\\_edPM.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32578/1/BCN_Carbononeutralidad_en_el_sector_energetico_Chile_15Oct_Rev_RT01_edPM.pdf)>
- [4] IPCC, «Summary for Policymakers», en Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2014, pp. 1-30.
- [5] C. Vásquez, D. Valdivia, H. Sepúlveda, y M. García, «Identificación y Cuantificación de Potenciales de Energías Renovables 2021», Unidad Gestión de Información División Energías Sostenibles. Ministerio de Energía de Chile, Technical report., 2021. [En línea]. Disponible en: <[https://exploradores.minenergia.cl/portal-ernc/websites/ICPER\\_2021\\_v2.pdf](https://exploradores.minenergia.cl/portal-ernc/websites/ICPER_2021_v2.pdf)>
- [6] H. González, W. Jofré, y M. Moreno, «Tecnologías de dominio público. Energía Eólica», Instituto Nacional de Propiedad Industrial, Technical

- report., 2017. [En línea]. Disponible en: <[https://www.inapi.cl/docs/default-source/default-document-library/articles-11336\\_recurso\\_1f94e8815a718490bafc0d7a20e53d9d0.pdf?sfvrsn=e800017c\\_0](https://www.inapi.cl/docs/default-source/default-document-library/articles-11336_recurso_1f94e8815a718490bafc0d7a20e53d9d0.pdf?sfvrsn=e800017c_0)>
- [7] H. González, W. Jofré, y M. Moreno, «Identificación de Potenciales Renovables: Caso Eólico. Hidrógeno Verde en la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena», Unidad Gestión de Información División Energías Sostenibles. Ministerio de Energía de Chile, Technical report., 2020. [En línea]. Disponible en: <[https://exploradores.minenergia.cl/portal-ernc/websites/Magallanes\\_White\\_Paper\\_Edicion\\_Feb20.pdf](https://exploradores.minenergia.cl/portal-ernc/websites/Magallanes_White_Paper_Edicion_Feb20.pdf)>
- [8] A. Zurita et al., «State of the art and future prospects for solar PV development in Chile», Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 92, pp. 701-727, 2018.
- [9] X. Li, C. J. Raorane, C. Xia, Y. Wu, T. K. N. Tran, y T. Khademi, «Latest approaches on green hydrogen as a potential source of renewable energy towards sustainable energy: Spotlighting of recent innovations, challenges, and future insights», Fuel, vol. 334, p. 126684, 2023.
- [10] M. T. Muñoz, H. Chávez, y J. Guajardo, «Economic Analysis: Green Hydrogen Production Systems», Processes, vol. 11, n.o 5, p. 1390, 2023.
- [11] M. S. Martín et al., «Parameterization proposal to determine the feasibility of geographic areas for the green hydrogen industry under socio-environmental and technical constraints in Chile», Int. J. Hydrog. Energy, vol. 50, pp. 578-598, 2024.
- [12] Badger J. Global Wind Atlas n.d. <https://globalwindatlas.info> (accessed June 12, 2024)
- [13] Ministerio de Bienes Nacionales. Infraestructura de datos geoespacial (IDE). IDE Chile n.d. <https://www.ide.cl/index.php/informacion-territorial/descargar-informacion-territorial> (accessed June 12, 2024).
- [14] Global Solar Atlas n.d. <https://globalsolaratlas.info/map?c=11.523088,8.173828,3> (accessed June 12, 2024)
- [15] NASA. PALSAR Radiometric Terrain Corrected low res 2014. <https://doi.org/10.5067/JBYK3J6HFSVF>.
- [16] A. Molina, M. Falvey, y R. Rondanelli, «A solar radiation database for Chile», Sci. Rep., vol. 7, n.o 1, p. 14823, 2017.

#### VII. BIOGRAPHIES



**Yunesky Masip Macía** received the Ph.D. degree in Industrial Engineering from University of Navarra, Spain, in 2014.

He is currently a Full Professor and a Ph.D. Supervisor with the Pontifical Catholic University of Valparaíso of the School of Mechanical Engineering, Quilpué, Chile. He is also the Chief Scientist of the Thematic research team projects in science and/or technology 2021.

His current research and academic area include energy technologies, specifically, renewable energy, combined heat and power, design of experiments and heat transfer phenomenon.

Dr. Masip has several publications on research areas, also is Associate Researcher to the International Collaboration Group with the Utrecht University and Technology Deggendorf University.



**Suleivys M. Nuñez Gonzalez** was born in 1988. She received the PhD degree of in biotechnology from Pontifical Catholic University of Valparaíso and the Federico Santa María Technical University, Valparaíso, Chile, in 2020 and the undergraduate degree of Chemical Engineering from Technological University of Havana, Havana, Cuba, in 2011.

Currently, is Associate Professor at the School of Chemical Engineering of the Pontifical Catholic University of Valparaíso. Her research and academic interests include statistics techniques and environmental sciences. In addition, he has collaborated with energy technologies in the Regular Fondecyt N°1241401 financed by ANID.



**Alejandro Fernandez.** He was born in 1989. He is Ph.D in Informatics Engineering of Technical University Federico Santa María (UTFSM), Chile. He is currently a Postdoctoral Researcher at the Texas State University. In addition, he works in the research fields of combinatorial optimization, operations research, metaheuristics, matheuristics, satisfiability modulo theories, and optimization in green routing area. He is member of Association for Constraint Programming (ACP) and he has participated in several international conferences and scientific project.