

PetroRenova

REVISTA CIENTÍFICA DE LA ENERGÍA

Vol. 1, Núm. 1
Abril-junio, 2025, Venezuela

INDEXED

ISSN-E: 3080-6666
D.L. ZU2025000146



PetroRenova Indexed

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15643304>

Revista Científica de la Energía es un órgano de divulgación internacional de amplio alcance en las áreas de petróleo, gas y energías renovables, editada por **Petróleos y Renovables S. A.**, en alianza con el **Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño**. Es una revista venezolana, científica, especializada, en proceso de indexación y arbitrada bajo el sistema doble ciego. Sus publicaciones, de acceso abierto, están bajo licencia Creative Commons (BY-NC-SA) Attribution 4.0 Internacional.

Su publicación es trimestral, tiene como objetivo principal divulgar contenidos inéditos (en español e inglés), con la finalidad de ampliar el conocimiento en la industria de la energía, desde la innovación hasta la sostenibilidad, en la construcción, optimización y crecimiento científico del futuro, con perspectivas epistemológicas y metodológicas, en el sector de la industria a nivel nacional e internacional.

PetroRenova Indexed está dirigida a investigadores, profesionales, docentes, estudiantes y a todo el que esté interesado en profundizar sus conocimientos en las áreas de petróleo, gas y energías renovables, ya que, por su naturaleza interdisciplinaria, aporta saberes, constructos, teorías, métodos y otras aproximaciones, en sus publicaciones tipo artículos científicos, de reflexión, técnicos, de opinión, ensayos, reseñas, entrevistas, entre otras.

Equipo Editorial

Comité Editorial

Directora

Ing. Evelyn Quintero

Editor Jefe: Ing. Alexis Antonio Zavala

Editora Académico: Ing. Raiza Negrón

Asistente Editorial: Licda. Yulimar Jansen

Asesora Legal: Abog. Alcira Rodríguez

Comité Científico

Esp. Elimar Anauro Rojas

Universidad del Valle, México.
<https://orcid.org/0009-0001-8616-3032>

Ing. Luis Edgardo Pérez

Universidad Venezolana de los Hidrocarburos. Venezuela.
<https://orcid.org/0009-0001-8616-3032>

Ing. Carlos Jhesid Lazo

Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia.
<https://orcid.org/0009-0007-4552-6435>

Ing. Omar Arístides Flores

IMR & Asociados, Argentina.
<https://orcid.org/0009-0006-1970-4026>

Ing. Yoel Antonio Vivas

Petróleos de Venezuela S.A., Venezuela.
<https://orcid.org/0000-0003-0873-3578>

Ing. Antonio Jiménez

CMA Energy Consulting Group. Colombia.
<https://orcid.org/0009-0003-2715-7868>

Equipo técnico

Diseño Gráfico

Licda. Yexi Castellano

Diagramadora OJS

Ing. Dorys L. Acosta C.

Soporte técnico

Ing. Carlos Montilla

Contacto

Correo electrónico: indexed.petrorenova@gmail.com



BY: se debe dar crédito al creador.

NC: Solo se permiten usos no comerciales de la obra.

SA: Las adaptaciones deben compartirse bajo los mismos términos.

Sumario

Presentación editorial

Una revista dedicada al futuro de la energía

A journal dedicated to the future of energy

Quintero, Evelyn

03-04

Artículos

- 1 Índice de oportunidad: Una oportunidad para jerarquizar áreas prospectivas en yacimientos maduros.

Opportunity index: an alternative to prioritize prospective areas in mature reservoir.

Bastardo González, Jeoriannys del Jesús

05-17

- 2 Potencial de las algas y la naturaleza en el secuestro de carbono

Algae and nature potential in carbon sequestration

Castro Mora, Marianto

18-35

- 3 Uso del hidrogeno y del amoníaco como combustible en turbinas de gas para la industria del petróleo, gas, petroquímica y generación eléctrica

Use of hydrogen and ammonia as fuel in gas turbines for the oil, gas, petrochemical and power generation industries

Martínez Llaurado, Luis Alberto

36-52

- 4 Predicción de la concentración de hidrógeno en un reactor de polimerización basado en machine learning

Hydrogen concentration prediction in a polymerization reactor based on machine learning

Sabino Montero, Karla Valentina y Noguera Hernández, José Ricardo

53-68

Instrucciones para los autores

69-81

Una revista dedicada al futuro de la energía

A journal dedicated to the future of energy

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15642757>

Recibido: 2025-03-29 **Aceptado:** 2025-03-30

Ing. Evelyn Quintero

Correo: evequinterolav@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-9352-4053>

Petróleos & Renovables S. A.
Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño
Zulia-Venezuela.

Presentación editorial

PetroRenova es una revista para ti, para ti que te gusta mantenerte actualizado y que quieres crear tu reputación como líder de la industria de la energía. Como fundadora, mi sueño es crear un medio de comunicación de vanguardia que refleje la innovación y el dinamismo de la industria energética actual, un medio para la investigación en el plano evolutivo y científico. Este sueño nació con la iniciativa de documentar historias de los protagonistas de nuestra Industria, a los que llamamos Héroes y es desde este momento, que se dio el primer paso para la creación de esta revista científica – experiencial específica para el petróleo, el gas y las energías renovables, que es de acceso abierto **PetroRenova Indexed**, *Revista Científica de la Energía*.

Acompañada de un equipo comprometido con dar experiencias de carácter mundial a los lectores y autores de la revista, presento en esta oportunidad, con orgullo y profundo compromiso el primer volumen 2025, número uno de **PetroRenova Indexed**, aquí se promete ampliar el conocimiento con innovación, sostenibilidad y mejores prácticas. Está dirigida a investigadores, profesionales, docentes y estudiantes de la mano con el Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño, institución universitaria que nos abrió sus puertas en cooperación del crecimiento interinstitucional, desarrollando conjuntamente actividades de docencia, investigación, extensión y servicios, dirigidos a contribuir en la formación de profesionales en áreas tecnológicas.

Así mismo, esta nuestra revista arbitrada por expertos de amplia trayectoria en sus respectivas áreas de investigación reúne en este primer número de lanzamiento, correspondiente a la edición abril-junio de 2025, 4 artículos que resaltan la importancia de estudios que generan soluciones integrales y relevantes en la actualidad. Así, **Jeoriannys Bastardo** evaluó índices de oportunidades como método inteligente para jerarquizar áreas prospectivas en yacimientos maduros y, a partir de datos existentes, determinó que los pozos de los yacimientos en estudio presentan un índice de oportunidad aceptable.

Las prácticas mejoradas en la gestión de procesos para mitigar el cambio climático y los impactos ambientales se reflejan en los estudios de **Mariato Castro** y **Luis Alberto Martínez**. Por un lado, Castro explora el potencial de las algas marinas aplicadas a soluciones basadas en el método de la naturaleza, dado su inmenso potencial para secuestrar carbono y fomentar prácticas agronómicas sostenibles. Martínez, por otro lado, presenta un estudio técnico en el cual analiza el uso del hidrógeno y el amoníaco como combustible en turbinas de gas, como alternativa prometedora en la reducción de emisiones en la industria del petróleo, gas y generación eléctrica, para reducir los impactos ambientales.

En ese mismo orden, **Karla Sabino** y **José Noguera**, con apoyo de la inteligencia artificial, utilizaron datos históricos para modelar la concentración de hidrógeno en un reactor de polimerización a través de Machine Learning en Python. Los autores confirmaron la efectividad del aprendizaje automático en el análisis predictivo de procesos industriales.

Los estudios presentados tienen un impacto positivo en la protección de los ecosistemas y en la transición actual hacia las energías renovables, ya que promueven prácticas innovadoras al utilizar métodos inteligentes como energías alternativas.

Evelyn Quintero
Directora

Índice de oportunidad: una oportunidad para jerarquizar áreas prospectivas en yacimientos maduros

Opportunity index: an alternative to prioritize prospective areas in mature reservoir

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15642856>

Recibido: 2025-01-21 Aceptado: 2025-03-07

Bastardo González, Jeoriannys del Jesús¹

Correo: bastardojd@pdvsa.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-5458-8632>

Resumen

Los yacimientos maduros, son aquellos que han sobrepasado su pico de producción, y a su vez se relaciona con un futuro poco prometedor y un bajo potencial. Esta declinación de la producción esta generalmente asociado a la madurez del yacimiento, existen otras variables que considerar, entre ellas, agotamiento de la presión, relación agua-petróleo, antigüedad de los datos existentes, así como las instalaciones y finalmente la rentabilidad económica. En este tipo de yacimientos es difícil jerarquizar las áreas prospectivas, es por eso, que la metodología del índice de oportunidad plantea la posibilidad de esta jerarquización con data existente, reduciendo los costos drásticamente. En el caso de estudio se logró identificar estas zonas y se modificó el plan de explotación. Como conclusión se obtuvo que la mayoría de los pozos de los yacimientos en estudio se ubican en el rango aceptable-malo y solo el 8% presenta un índice de oportunidad aceptable.

Palabras clave: índice de oportunidad, petrofísica, presiones, prospectividad.

Abstract

Mature reservoirs are those that have exceeded their peak of production, and in turn are related to an unpromising future and low potential. This decline in production is generally associated with the maturity of the reservoir, there are other variables to consider, including pressure depletion, water-oil ratio, old existing data, as well as facilities and economic profitability. In this type of reservoirs, it is difficult to prioritize the prospective areas, which is why the opportunity index methodology presents the possibility to build this hierarchy using existing data, reducing costs drastically. In the case of study, it was possible to identify these areas and modify the exploitation plan. In conclusion the majority of wells from the reservoirs under study are in the acceptable-bad range and only 8% present an acceptable opportunity index.

Keywords: opportunity index, petrophysics, pressures, prospectivity

¹Dra. en Gerencia Empresarial. MSc. Caracterización y Explotación de Yacimientos. Ingeniero en Petróleo. Especialista en Geología Petrolera. Petrozamora-Lagunillas, Zulia, Venezuela.

Introducción

Al evaluar yacimientos maduros, entendemos que normalmente permanecen al margen del plan de explotación, dejando la adquisición de datos nuevos, es por esto que, al momento de tomar decisiones relevantes respecto a los mismos, el tema financiero cobra mayor valor, debido a que los costos se incrementan al establecer la necesidad de información nueva para retomar la explotación de estos yacimientos. De igual manera, se han dejado yacimientos altamente complejos, fuera de los planes de explotación de un campo, debido al descubrimiento de otros yacimientos cuyas características hacen más fácil la recuperación de producción, y los primeros quedan mal clasificados como marginales.

En este escenario, la interrogante sería ¿es posible evaluar oportunidades nuevas con la data existente?

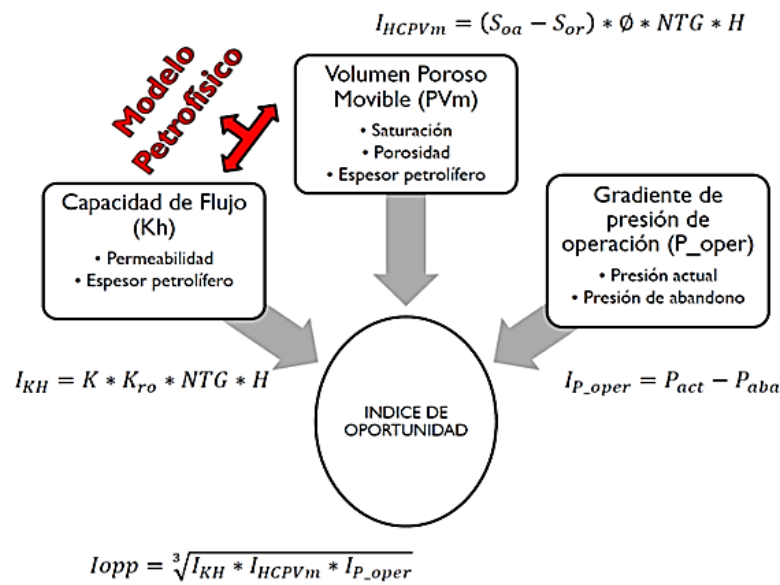
1. Fundamentos teóricos

El índice de oportunidad es un método inteligente para jerarquizar áreas prospectivas, debido a que permite identificar áreas de alto potencial de producción, reduciendo drásticamente los recursos requeridos y la incertidumbre para definir estas áreas. Dicho índice, es calculado a partir de las propiedades de la roca y los fluidos, así como, incluye un factor determinante, como lo es la presión de operación.

Al determinar las áreas prospectivas a través de la metodología del índice de oportunidad, se reduce drásticamente los recursos necesarios y la incertidumbre para definir estas zonas, siendo una herramienta práctica para apoyar el plan de desarrollo del yacimiento.

Según Molina y Rincón (2009), el potencial de producción de un área es calculado basado en las propiedades de la roca y el fluido, combinado con la capacidad energética asociada principalmente a la presión del yacimiento. Los parámetros anteriormente mencionados son combinados y normalizados, para generar un “índice de oportunidad” con valores entre 0 y 1, capaz de identificar zonas de gran potencial. En la figura 1 se evidencian las variables involucradas en la determinación del índice de oportunidad.

Figura 1: Variables involucradas en la determinación del Índice de Oportunidad



Fuente: Bastardo (2021)

Donde,

I_{opp} = Indicie de oportunidad (fracción)

I_{KH} =Índice de capacidad de flujo del petróleo (fracción)

I_{HCPVm} =índice del volumen poroso movable (fracción)

I_{P_oper} =Índice de presión de operación (fracción)

La proporción que ocupa cada índice dentro de la determinación del índice de productividad se puede evidenciar en la matriz planteada en la tabla 1.

Los coeficientes que tienen mayor peso al definir el grado de certidumbre son los asociados a propiedades de la roca y el fluido, es decir, que al momento de aplicar esta metodología debe existir un Modelo Petrofísico robusto. Una vez que estos coeficientes son generados, las ecuaciones son construidas y leídas en un simulador numérico, y se puede verificar el potencial de cada una de las áreas evaluadas. Un criterio para iniciar el análisis de resultados del índice de oportunidad, se visualiza en la tabla 2.

Tabla 1: Matriz de evaluación del peso de los coeficientes para definir el grado de incertidumbre

Definición del grado de incertidumbre		Rango de 0 a 1, donde: 0=malo y 10=excelente	peso del coeficiente
KH	1 Existencia de núcleos con análisis especiales y convencionales para toda la columna estratigráfica (porosidad, permeabilidad absoluta, presión capilar, permeabilidad relativa, propiedades eléctrica entre otros)	6	0,4
	2 Información de registro de permeabilidad y espesor de roca de todo el yacimiento	8	
	3 Incorporación en el modelo de información de correlación de núcleos y registros	8	
	4 Definición de de cut off para discriminar ANP	9	
	5 Existencia de data de la relación KH derivada de la interpretación de análisis de pruebas de pozos	7	
HCP/m	1 Definición y calibración de núcleos y registros de valores de porosidad	8	0,35
	2 Definición de de cut off para discriminar ANP	6	
	3 Definición de valores de Sw y Sg, de acuerdo a su aplicación	5	
	4 Definición de contactos originales de los fluidos en sitio	7	
	5 Existencia y validación de un modelo estático en 3D	7	
P_oper	1 Existencia de una base de datos con suficiente data de presión en el yacimiento tales como presiones estáticas, build ups y que hayan sido validados ploteados y procesados	4	0,25
	2 Existencia organizada de una data de producción de pozos (petróleo, agua y gas)	7	
	3 Acoplamiento y correspondencia entre las presiones y comportamiento de producción de los pozos para determinar el grado de complejidad del yacimiento	5	
	4 Correspondencia entre la presión y producción con la historia de eventos en el yacimiento para determinar consistencia de la data	4	
	5 Documentación de los resultados de análisis de la historia de presión y producción	4	
		95	1

Fuente: Molina y Rincón (2009)

Tabla 2: Clasificación del Índice de oportunidad

lopp	Clasificación
0-0,2	Malo
0,2-0,4	Regular
0,4-0,6	Aceptable
0,6-0,8	Bueno
0,8-1	Excelente

Fuente: Molina y Rincón (2009)

2. Metodología

En el campo costanero Bolívar, los yacimientos de edad Eoceno, se caracterizan por tener alta complejidad estructural, poca data y baja producción por lo cual no son incluidos en los planes de explotación de los campos por el alto grado de incertidumbre que representa. Los yacimientos en estudio contaban con datos disponibles pero dispersos, no existía un modelo petrofísico establecido, y por ende las áreas prospectivas eran desconocidas, es por ello que la metodología

a utilizar implica el desarrollo del modelo petrofísico para luego determinar las áreas prospectivas a través del índice oportunidad. En la figura 2 se puede observar el diagrama de flujo de la metodología a utilizar.

Figura 2: Esquema de la Investigación



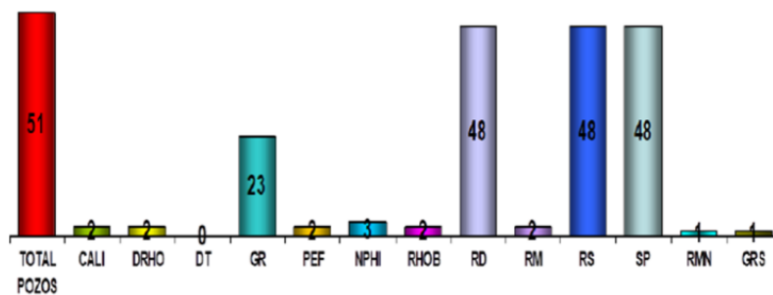
Fuente: Bastardo (2021)

3. Resultados

3.1. Inventario de los datos

Registros. Se validó la disponibilidad de registros corridos por pozo de los que se encuentran actualmente completados en el yacimiento, lo cuales se pueden evidenciar en la figura 3.

Figura 3: Inventarios de registros disponibles en el yacimiento



Fuente: Bastardo (2021)

Núcleos. Se realizó una revisión de los pozos completados en el yacimiento de estudio a los cuales se le había tomado núcleos y se validó análisis disponibles. De acuerdo a la revisión se determinó que existen 9 pozos en los yacimientos, que poseen toma de núcleos, sin embargo, solo 4 de ellos poseen análisis. Estos datos se observan en la tabla 3.

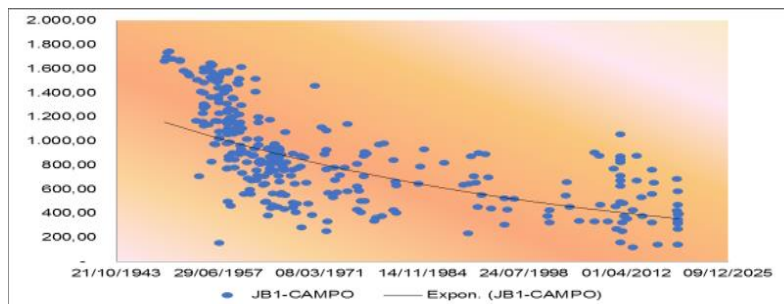
Tabla 3: inventario de núcleos en el área

N°	POZO	INTERVALO	DESCRIPCION LITOLÓGICA	FORMACION	EDAD	ϕ	K	So	Sw	Gravedad Específica
1	JB1-0001	2330'-3140'	X	MISOA	EOCENO					
2	JB1-0002	3273'-3842'	X	MISOA	EOCENO	X	X	X	X	X
3	JB1-0003	2859'-3353'	X	MISOA	EOCENO					
		3401'-3506'	X	MISOA	EOCENO					
		3600'-3754'	X	MISOA	EOCENO	X	X	X	X	X
4	JB1-0004	2922'-3454'	X	MISOA	EOCENO	X	X	X	X	
5	JB1-0005		X	MISOA	EOCENO					
6	JB1-0007	2627'-3400'	X	MISOA	EOCENO					
7	JB1-0008	3653'-3659'	X	MISOA	EOCENO					
8	JB1-0044	5488'-6100'	X	MISOA	EOCENO					
9	JB1-0048	3016'-3426'	X	MISOA	EOCENO	X	X	X	X	

Fuente: Bastardo (2021)

Datos de presión. Se realizó una revisión de la data de presión existente, y se incluyó data de presiones obtenidas a partir de niveles estáticos de las diferentes entradas de taladros de subsuelo. Los datos recopilados se observan en la figura 4.

Figura 4: Presiones tomadas en el yacimiento JB1-CAMPO a lo largo de su vida productiva



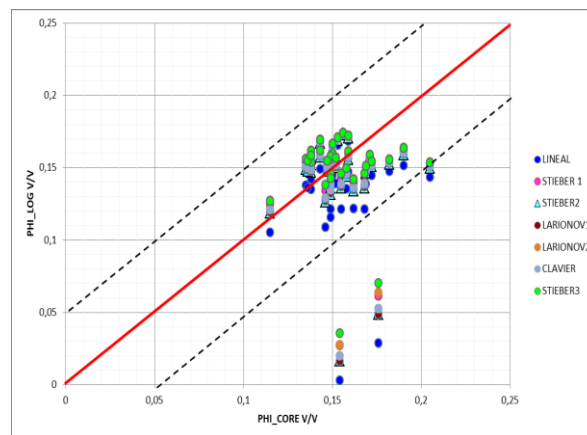
Fuente: Bastardo (2021)

3.2. Modelos petrofísicos

Modelo de arcillosidad y porosidad. De acuerdo a la metodología planteada, en ausencia de análisis de difracción de rayos X, se seleccionó como modelo de volumen de arcilla, aquel que permita la mejor correlación con los análisis de núcleos referidos, específicamente a la porosidad.

El método que presento mejor correlación en cuanto a los valores de porosidad, es el generado con el método de volumen de arcilla de Stieber 3, por lo que se establece, que este es el método a utilizar para los yacimientos en estudio. Dicha comparación se observa en la figura 5.

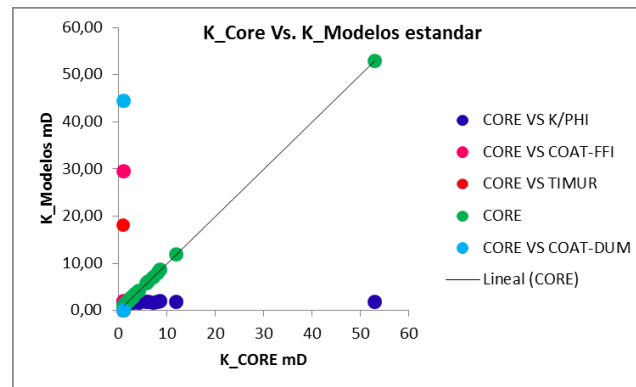
Figura 5. Porosidad del núcleo Vs porosidad del registro



Fuente: Bastardo (2021)

Modelo de permeabilidad. Se logró establecer, una relación entre la porosidad y la permeabilidad obtenida del pozo JB1-0048 (pozo clave de la investigación), observándose que a medida que incrementa la porosidad, incrementa la Permeabilidad. De igual forma, la permeabilidad promedio a lo largo de ambos yacimientos, no supera 2 md, lo que permite establecer una abundante laminaridad. Estos resultados validan los obtenidos por el registro de resonancia magnética corrido al pozo JB1-0051, ubicado en el área Norte. Los resultados se observan en la figura 6.

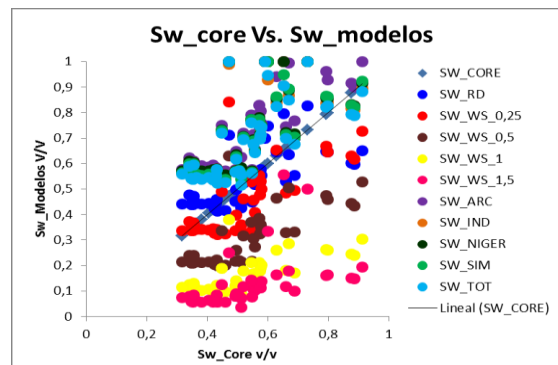
Figura 6. K núcleo Vs. K modelos



Fuente. Bastardo (2021)

Modelo de saturación. Se generaron las curvas de Saturación de agua, para cada uno de los modelos estándar, y se compararon con la generada a partir de datos de núcleo. Se observa que los valores que presentan mejor correlación son: el modelo generado a partir de datos de núcleos y el modelo de Waxman-smits utilizando un valor de Q_v de 0.25. los resultados se observan en la figura 7.

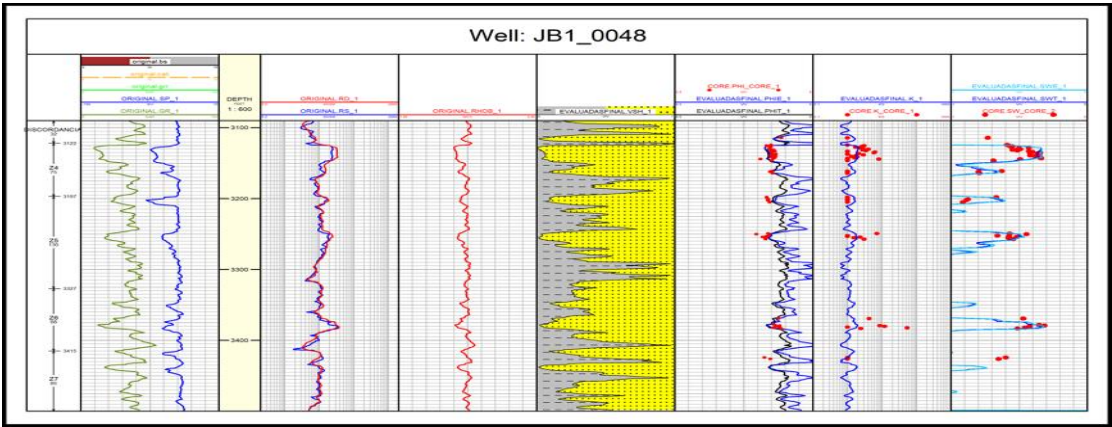
Figura 7. Sw Núcleo Vs. Sw Modelos



Fuente. Bastardo (2021)

Luego de establecer los modelos para los yacimientos, se generó la evaluación petrofísica final en el pozo clave y se comparó con los análisis de núcleos. Esta comparación se evidencia en la figura 8.

Figura 8. Modelos Petrofísicos establecidos y su correspondencia con los valores de Núcleos



Fuente. Bastardo (2021)

Evaluación de pozos y mapas de isopropiedades. Se obtuvo sumarios petrofísicos por unidad estratigráfica, sin embargo, para efectos del objetivo de la investigación, se utilizó el promedio general por pozo, los sumarios discretizados por unidad, con su respectiva sabana petrofísica. El ejemplo de los sumarios generados se observa en la tabla 4.

Tabla 4. Sumario Petrofísico por pozo

POZO	AT	AN	ANP	VSH	PHIE	SWE	K
JB1-0001	53,50	53,50	38,00	18,73	15,13	64,90	1,79
JB1-0002	115,00	115,00	63,00	14,37	16,19	65,10	1,92
JB1-0003	65,60	65,60	57,60	16,64	15,64	38,24	1,82
JB1-0004	140,00	73,00	55,00	15,38	13,58	54,52	1,60
JB1-0005	210,00	96,00	37,00	15,50	13,08	72,83	1,61
JB1-0006							
JB1-0007	81,50	79,50	70,00	16,40	15,12	51,18	1,86
JB1-0008	33,50	27,50	18,00	17,80	14,50	59,77	1,63
JB1-0009	38,50	25,50	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00
JB1-0010							
JB1-0011	30,50	22,50	14,00	15,32	14,00	64,12	1,75
JB1-0012	61,00	50,00	45,50	17,80	14,18	56,80	1,66
JB1-0013	128,00	128,00	128,00	13,89	13,63	38,65	2,02
JB1-0014	541,00	33,60	26,40	17,43	11,90	50,27	1,43
JB1-0015	192,00	14,40	12,00	15,20	11,35	48,70	1,37
JB1-0016	714,00	57,00	37,00	15,70	12,14	74,92	1,41
JB1-0017	220,50	196,00	158,50	21,38	17,15	35,43	1,38
JB1-0018	102,75	1,75	1,75	16,90	11,10	82,63	1,35
JB1-0019	142,00	142,00	142,00	16,48	14,00	38,33	1,10
JB1-0020	196,50	193,70	158,50	16,16	15,68	54,25	1,26

Fuente. Bastardo (2021)

3.3 Índice de oportunidad yacimiento de edad eoceno

Para la elaboración de los mapas para determinar el índice de oportunidad se utilizó la aplicación OFM.

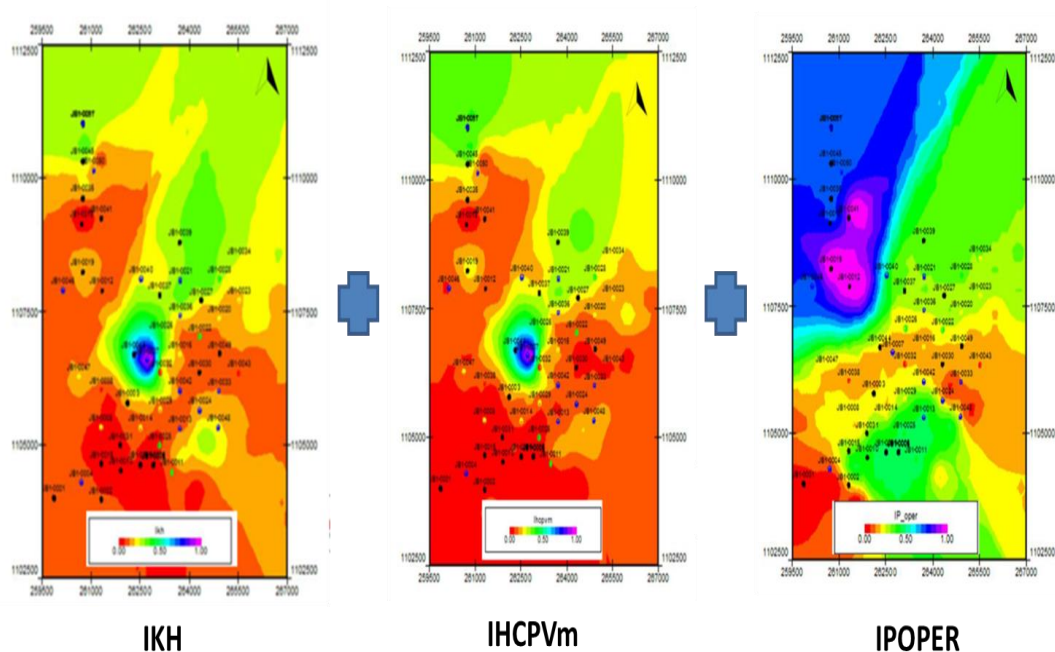
Índice de capacidad de flujo IKH. Las mejores propiedades se observan en la parte central del yacimiento.

Índice de Almacenamiento o Volumen Poroso Movable IHCPVm. Referente al volumen poroso que tiene la capacidad de almacenar fluido, se mantiene que el mejor comportamiento esta al centro del yacimiento.

Índice de presión de operación IPOPER. Hacia el norte se mantiene un rango de 500-600 lpc, mientras que hacia el sur se pueden encontrar presiones de 235 lpc.

El mapa de los índices de oportunidad se evidencia en la figura 9.

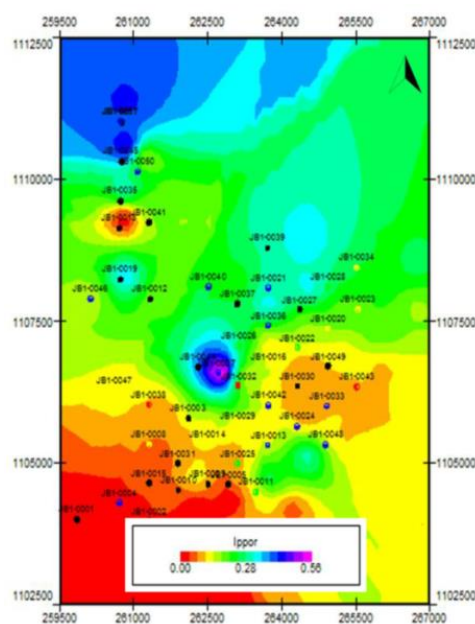
Figura 9. Mapas de índices IKH, IHCPVm, IPOPER



Fuente. Bastardo (2021)

Índice de oportunidad. El índice de oportunidad relaciona los tres índices calculados previamente y permite jerarquizar, las áreas donde existen las mejores oportunidades. En la figura 10 se observan los resultados, evidenciándose que aun cuando existan propiedades de roca excelentes, la presión de operación influye de manera determinante en la productividad de los pozos.

Figura 10. Mapa de índice de oportunidad



Fuente. Bastardo (2021)

3.4. Análisis y discusión de los resultados

De acuerdo al resultado y utilizando la clasificación mencionada tenemos que del 100% de la población en estudio, solo un 8% es aceptable, un 23% regular y un 69 % malo, por lo cual de establecer un plan de explotación de los yacimientos debería estar dirigido principalmente a las zonas donde se muestra un índice de oportunidad aceptable. Gráficamente, el resultado se observa en la Figura 11.

Figura 11. Porcentaje de pozos por categoría según la clasificación del Índice de Oportunidad



Fuente: Bastardo (2021)

Consideraciones finales

- Los yacimientos en estudio presentan datos muy antiguos, de baja resolución, y se encuentran dispersos a nivel de bases de datos corporativos.
- La presión actual de los yacimientos se ubica en 400 lpc para el área Campo y 600 lpc para el área Norte.
- La mejor capacidad de flujo y el mejor almacenamiento se observan al Norte al centro-Noreste del yacimiento.
- La presión de operación más alta se observa al norte donde están en el rango de 500-600 lpc, mientras que para el sur llega a ubicarse en valores menores a los 300 lpc.
- El índice de oportunidad para los pozos de los yacimientos en estudio se ubica en el rango aceptable-malo, donde la mayor población de pozos se encuentra en esta última categoría, solo el 8% presenta un índice de oportunidad aceptable.

Referencias

- Avendaño, J. (2015). *Análisis de los Modelos Petrofísicos para Formaciones Clásticas*. (Trabajo Especial de grado). Instituto Politécnico Nacional. México.
- Bastardo, J. (2021). *Determinar áreas prospectivas a través de la metodología del índice de oportunidad en yacimientos de edad eoceno del campo Bachaquero Tierra*. EM Petrozamora. UVH. Venezuela.
- Molina, A. y Rincón, A. (2009). *Explotation Plan Desing Based On Opportunity Index Analysis In Numerical Simulations Models*. [Versión Electrónica]. SPE 122915.
- Pérez, A. et al. (2019). *Implementación optimizada del índice de oportunidad del yacimiento (ROI) en campos maduros* [Versión Electrónica]. Universidad Autónoma de México.

Para citar este artículo (APA):

- Bastardo, J. (2025). Índice de oportunidad: Una oportunidad para jerarquizar áreas prospectivas en yacimientos maduros. *PetroRenova Indexed, Revista Científica de la Energía*. Vol.1, núm. 1. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15642856>

Declaración de conflicto de interés y originalidad

Conforme a lo estipulado en el *Código de ética y buenas prácticas* publicado en ***PetroRenova Indexed, Revista Científica de la Energía***, el autor **Bastardo González, Jeoriannys del Jesús** declara al Comité Editorial que no tiene situaciones que representen conflicto de interés real, potencial o evidente, de carácter académico, financiero, intelectual o con derechos de propiedad intelectual relacionados con el contenido del artículo: ***Índice de oportunidad: una oportunidad para jerarquizar áreas prospectivas en yacimientos maduros***, en relación con su publicación. De igual manera, declara que el trabajo es original, no ha sido publicado parcial ni totalmente en otro medio de difusión, no se utilizaron ideas, formulaciones, citas o ilustraciones diversas, extraídas de distintas fuentes, sin mencionar de forma clara y estricta su origen y sin ser referenciadas debidamente en la bibliografía correspondiente. Consiente que el Comité Editorial aplique cualquier sistema de detección de plagio para verificar su originalidad.

Potencial de las algas y la naturaleza en el secuestro de carbono

Algae and nature potential in carbon sequestration

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15643128>

Recibido: 2025-01-21 Aceptado: 2025-03-07

Castro Mora, Marianto¹

Correo: notasgeologiavenezuela@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-1330-6476>

Resumen

Algunos tipos de algas han demostrado ser entre 10 y 50 veces más potentes para extraer carbono de la atmósfera que otras plantas vasculares. El mecanismo de secuestro de CO₂ se realiza durante la fotosíntesis, vía bioconcentración. La evaluación del desempeño reveló que la eficiencia de captura y secuestro de CO₂ por parte de las microalgas oscila entre el 40% y el 93,7%. En la búsqueda de un futuro sostenible, no debemos pasar por alto el inmenso potencial de las soluciones basadas en la naturaleza. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, sugiere, no olvidar que los cultivos rurales juegan un papel significativo en el secuestro de carbono en el suelo a través de la producción de biomasa y el cuidado de cultivos perennes. Estos estudios son cruciales a la hora de fomentar prácticas agronómicas sostenibles que pueden ayudar a secuestrar carbono. Adicionalmente en el artículo se tratan otros métodos como ejemplo de utilización de la naturaleza en el secuestro de carbono y métodos industriales de secuestro de carbono, CCS (evita que se añada más CO₂) y DAC (elimina el CO₂ que ya está en la atmósfera) en Islandia.

Palabras clave: algas, quelpo, cambio climático, CO₂.

Abstract

Algae's have been shown to be 10 to 50 times more potent at extracting carbon from the atmosphere than other vascular plants. The CO₂ sequestration mechanism is carried out during photosynthesis, via bioconcentration. The performance evaluation revealed that the CO₂ capture and sequestration efficiency of microalgae ranges between 40% and 93.7%.

In the search for a sustainable future, we should not overlook the immense potential of nature-based solutions. The Food and Agriculture Organization of the United Nations suggests that we should not forget that rural crops play a significant role in sequestering carbon in the soil through biomass production and the care of perennial crops. These studies are crucial in promoting sustainable agronomic practices that can help the sequester carbon process.

¹ Ingeniero Geólogo, Magister Scientiarum Geología Sedimentaria. Venezuela. Consultor independiente, Toronto.

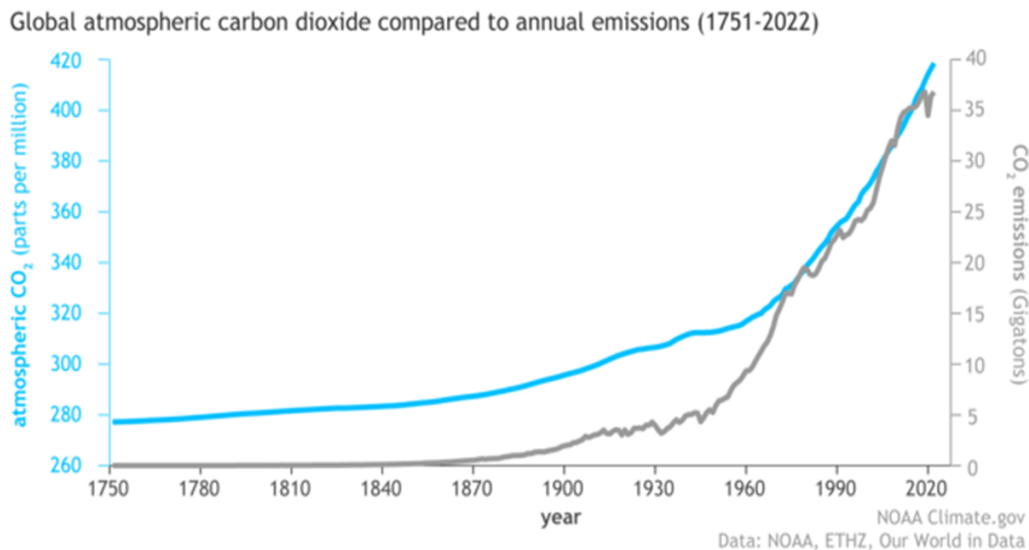
Additionally, the article discusses other methods such as the use of nature in carbon sequestration and industrial methods of carbon sequestration, CCS (prevents more CO₂ from being added) and DAC (removes the CO₂ already in the atmosphere) in Iceland.

Keywords: algae, kelp, climate change, CO₂.

Antecedentes

Hoy en día, los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera son más de un 50% superiores a los de antes del inicio de la era industrial. Por ello, ya no basta con frenar nuestras emisiones, también debemos eliminar activamente el dióxido de carbono de la atmósfera (World Economic Forum, 2025). Las emisiones aumentaron lentamente a alrededor de 5 gigatoneladas (una gigatonelada equivale a mil millones de toneladas métricas) por año a mediados del siglo XX antes de dispararse a más de 35 mil millones de toneladas por año a fines del siglo. La cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera (línea azul) ha aumentado junto con las emisiones humanas (línea gris) desde el comienzo de la Revolución Industrial en 1750 (Figura 1).

Figura 1: Dióxido de carbono atmosférico global comparado con la emisión anual (1751-2022).



Fuente: Gráfico tomado de Lindsey (2024).

La amenazante crisis del cambio climático y la contaminación resultante de diversas intervenciones antropogénicas ha atraído la atención mundial durante las últimas décadas. Sin

embargo, los métodos de captura y almacenamiento no biológico de carbono que comenzaron a ensayarse y que en un principio se consideraron como una tecnología muy prometedora para mitigar este escenario preocupante, resultaron no ser económicamente viables y sus implicaciones ambientales a largo plazo no estaban claras.

Alternativamente, se comenzó a experimentar con la captura biológica de dióxido de carbono (CO₂) mediante microalgas. Este método, hoy en día, se considera un medio atractivo para reciclar el exceso de CO₂ generado por las centrales termo-eléctricas, los medios de transporte, las erupciones volcánicas, la descomposición de materia orgánica, los incendios forestales y muchos otros problemas ambientales que están afectando al planeta.

Adicionalmente, la reforestación, la gestión sostenible de suelos agrícolas y la restauración de ecosistemas marinos como manglares y praderas marinas son métodos clave que permiten que las plantas y los suelos absorban y retengan el dióxido de carbono de la atmósfera, que pasa a formar parte de la biomasa y el suelo de forma natural.

Introducción

Las algas y microalgas tienen una alta capacidad de absorción de carbono sobre todo las denominadas algas pardas. Se estima que las algas que crecen naturalmente en los océanos de la Tierra secuestran actualmente 173 millones de toneladas de CO₂ por año, a razón de 50 toneladas o más por hectárea. Las algas absorben grandes cantidades de CO₂ a través de la fotosíntesis para crear biomasa. Este carbono queda secuestrado para siempre cuando el alga muere y se entierra en las profundidades del océano, ya sea en sedimentos o como carbono orgánico disuelto por debajo de los 1.000 metros de profundidad.

La plantación de árboles y manglares representa un poderoso medio para secuestrar dióxido de carbono y regenerar los ecosistemas. La selva amazónica almacena más de 75 000 millones de toneladas de carbono y, como tal, está en el centro de la crisis climática mundial. Desempeña un papel crucial en la lucha contra el cambio climático; su destino está íntimamente ligado a la lucha mundial contra el cambio climático.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, en la más reciente Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales de la FAO (2020), el área total de los bosques del mundo es de aproximadamente 4.06 billones de hectáreas. Estos bosques representan uno de los principales sumideros de carbono por su

capacidad natural de absorber el dióxido de carbono de la atmósfera mediante la fotosíntesis y almacenarlo en sus estructuras físicas (tronco, raíces, ramas y hojas) y posteriormente en el suelo; a este proceso se le conoce como secuestro de carbono. Este método de captura de carbono mediante la gestión de la tierra mejora el almacenamiento natural de CO₂ en el suelo. Además de tener el beneficio obvio de la captura de carbono, este método ofrece varios beneficios colaterales, como un mayor rendimiento de los cultivos, una mejor calidad del agua, una mejor salud del suelo y, en algunos casos, una mayor rentabilidad de las explotaciones agrícolas. El método se puede llevar a cabo de varias maneras, desde la plantación de cultivos de cobertura hasta el uso de compost.

Captura y almacenamiento de carbono (CCS), la filosofía de esta técnica consiste en capturar y almacenar el carbono antes de que abandone las instalaciones industriales. Existen varias formas de atraparlo, que abarcan desde separación de gases tras la combustión hasta el uso de combustión con oxígeno puro, conocida como oxidación, para producir CO₂ prácticamente puro. Una vez que se ha secuestrado el carbono, puede inyectarse en formaciones geológicas bajo tierra o bien convertirse en materia prima para su uso en otros procesos industriales.

Un método reciente de captura de carbono consiste en la erosión mejorada, que consiste en triturar rocas y esparcirlas sobre la tierra, lo que puede dar como resultado la formación acelerada de carbonato estable a partir del CO₂. Su naturaleza temprana significa que es difícil predecir la utilización y el costo del carbono de este método.

La mineralización de carbono utiliza basalto o desechos minerales alcalinos (aunque estos últimos son limitados) para crear reacciones naturales entre el CO₂ y las rocas reactivas que dan como resultado su captura y almacenamiento. Este método presenta una oportunidad de almacenamiento permanente, ya sea a través de minerales carbonatados subterráneos o en los de la superficie de la Tierra. Sin embargo, conlleva algunos riesgos ambientales potenciales, incluidas consideraciones logísticas y técnicas complejas.

Islandia acogerá la mayor planta de secuestro de carbono en el mundo, la llamada Planta Mamut (Figura 2), que comenzó a operar en mayo 2024. Esta planta utilizará tecnología de captura directa de aire (DAC, por sus siglas en inglés). Estas tecnologías de última generación emplean dispositivos mecánicos para extraer directamente el dióxido de carbono de la atmósfera. El CO₂ capturado se puede almacenar geológicamente o reutilizarse en la producción de

materiales industriales y combustibles sintéticos, lo que ofrece una solución flexible y potencialmente ubicua para reducir las concentraciones atmosféricas de CO₂. Islandia utiliza casi exclusivamente energía renovable en todos sus procesos. La planta Mamut no es una excepción, ya que emplea energía geotérmica de la central Hellisheidi para alimentar sus operaciones, lo que minimiza su huella de carbono. La captura de CO₂ se realizará a través de 72 unidades de recolección que filtran el aire, absorben el CO₂ y luego lo combinarán con agua para inyectarlo en formaciones basálticas subterráneas. Aquí, el CO₂ reaccionará con el basalto y se mineralizará, convirtiéndose en roca y permaneciendo almacenado de manera permanente. La compañía suiza detrás del proyecto planea escalar esta tecnología para alcanzar una capacidad de captura de megatonnes para 2030 y de gigatonnes de CO₂ para 2050, lo que podría ser un importante apoyo para cumplir con los objetivos climáticos globales. Por ahora, el principal reto de la tecnología DAC es reducir sus costes y mejorar su eficiencia energética. Así, capturar una tonelada de CO₂ cuesta alrededor de mil dólares, pero se espera que esta cifra se reduzca a trescientos de aquí al año 2030.

Figura 2: Planta Mamut, Islandia.



Fuente: Gráfica tomada de l'MNOVATION (2024).

Ejemplos de utilización de las algas en el secuestro de carbono

Se presentan algunos ejemplos de la aplicación de las algas en el secuestro de carbono:

- Dentro de las aplicaciones para mitigar el cambio climático se está comenzando a utilizar el cultivo de algas quelpo (Figura 3). Esta es una solución natural infrautilizada que puede ayudar a mitigar el cambio climático, al tiempo que aporta numerosos beneficios para la biodiversidad, la salud de los océanos (desacidificación y oxigenación de las aguas), las comunidades locales y la resiliencia. Sin embargo, aún existen lagunas en el conocimiento de la cantidad y la velocidad a la que el alga (silvestre o cultivada) es secuestrada y se añade a la reserva de carbono azul en el fondo del océano. Un estudio de cuatro años utilizará el alga gigante piloto (y posteriormente de tamaño comercial) de Kelp (quelpo) Blue (el primero de su clase) en alta mar de Namibia para realizar pruebas de campo con el fin de comprender mejor la capacidad del cultivo de algas gigantes en alta mar para secuestrar carbono.

Figura 3: Alga quelpo.



Fuente: Foto tomada de GENOMICA (2024)

- Investigadores chilenos están intentando determinar el enorme potencial que tienen las algas marinas trabajando en el primer proyecto de “Carbono Azul” que consiste en el carbono que retienen los ecosistemas costeros y marinos, manglares, marismas, praderas de pastos marinos, bosques de macroalgas, entre otros (Figura 4). Se trata del carbono que se encuentra como biomasa en estos ecosistemas y a la vez enterrado en los sedimentos. Una de las oportunidades relevantes que ofrece hoy el carbono azul es el secuestro de carbono que realizan estos ecosistemas, es decir, que lo almacenan a largo plazo, esto en escalas temporales climáticamente significativas por cientos de años o más, explica Octavia Barra, especialista en algas de Fundación Chile. En la región de Atacama, en la zona de Bahía Inglesa, Anglo American junto a Fundación Chile, el centro de innovación acuícola AquaPacífico y la Universidad Andrés Bello adelantan un proyecto que consiste en el cultivo de macroalgas con capacidad potencial de absorción de emisiones de carbono cincuenta veces más potente que algunos ecosistemas terrestres todo ello enmarcado dentro del programa de compensar las emisiones de CO₂ para el año 2040 en Chile.

Figura 4: Proyecto Carbono Azul.



Fuente: Gráfico tomado de Fundación Chile, Iniciativa Carbono Azul (2025)

- En Terranova y Labrador, Canadá se está utilizando el alga denominada queipo, cuyo cultivo es carbono negativo (lo que significa que es una actividad va más allá de la neutralidad de

carbono al eliminar más CO₂ del que emite) y puede ser utilizada como biomasa en la industria alimenticia y cosmética o sumergiéndola en las profundidades del océano (Figura 5). Este estudio se basa en el ejemplo de la costa chilena con el alga denominada cohayuyo, alimento clásico de las zonas costeras de Chile. Muchos han comenzado recientemente a reconocer las algas como una posible fuente alternativa de alimento. Los humanos han consumido algas durante miles de años. Pero sólo recientemente hemos centrado nuestra atención en su potencial nutricional y ambiental. Las algas y microalgas son ricas en proteínas. Contienen aminoácidos esenciales, ácidos grasos, omega-3, -6 y -7, y vitaminas A, D y E.

Figura 5: Bosque de alga queipo, Terranova, Canadá.



Fuente: Jenn Burt, 2023, Radio Canadá Internacional. Documento en línea

- Cultivar y enterrar algas en el Sahara podría ser una solución novedosa contra la crisis climática. La empresa londinense Brilliant Planet alquiló 6.100 hectáreas de terreno a las afueras de la remota ciudad costera de Akhfenir, en el sur de Marruecos, encajonada entre el océano Atlántico al norte y el Sahara al sur y lo está utilizando para cultivar algas (Figura 6). Las algas se extraen del agua, se bombean a una torre de 10 pisos y se pulverizan en el aire del desierto. En los aproximadamente 30 segundos que tarda en llegar al suelo, el aire caliente seca la biomasa, dejando copos de algas hipersalinas que pueden recogerse y enterrarse a poca profundidad, secuestrando su carbono durante miles de años, afirma la empresa. Una vez que se complete su

primera planta a gran escala (1.000 acres), podrá eliminar alrededor de 40.000 toneladas de CO₂ al año. Esto equivale a las emisiones producidas por unos 92.000 barriles de petróleo. Después de la ampliación total, se prevé que el sistema elimine 2 gigatoneladas de CO₂ al año.

Figura 6: Planta piloto de Brilliant Planet en Akhfenir (Marruecos).



Fuente: Tomada de Algae Planet (2023).

- Qualitas, una empresa de Nuevo México (Figura 7), opera una granja de 97 acres del género de algas *Nannochloropsis* con fines nutricionales y de combustible. El dióxido de carbono inyectado en las plantas de algas para estimular el crecimiento las transforma en un sumidero natural de carbono. Actualmente, para producir 1 kilogramo de algas, el equipo de Qualitas utiliza 2,7 kg de CO₂ (Avana Andrade, San Mateo County Carbon, 2024-2025).

Figura 7: Qualitas, Nuevo México.



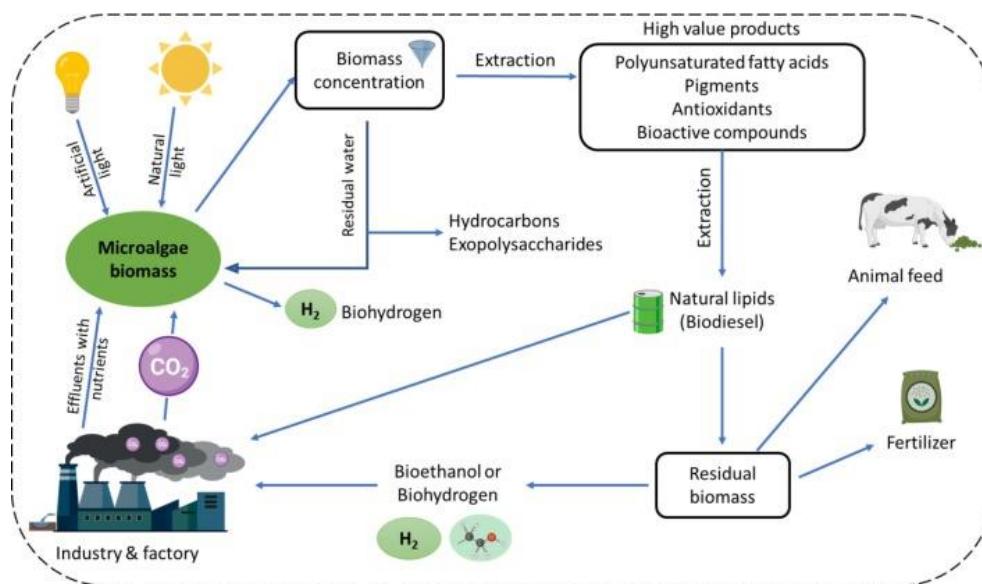
Fuente: tomada de Calatayud (2020). Documento en línea

- India es el tercer mayor emisor de carbono, detrás de China y Estados Unidos, y no ha fijado un plazo para alcanzar la neutralidad de carbono, más bien ha impulsado nuevas inversiones en carbón y minería. Pero los científicos observan cómo el cultivo de algas puede ayudar a reducir el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero, revertir la acidificación del océano y mejorar el ambiente marino. Científicos marinos del gobierno, han comentado que las algas son una alternativa positiva porque los hábitats costeros y humedales que absorben cinco veces más carbono que los bosques en tierra. India, con una línea costera de 8.000 km, apunta a aumentar la producción de algas de las 30.000 toneladas actuales a más de un millón de toneladas para 2025. Las algas crecen en abundancia a lo largo de las costas de Tamil Nadu y Gujarat y alrededor de Lakshadweep y las islas Andaman y Nicobar. También hay ricos bancos de algas en Mumbai, Ratnagiri, Goa, Karwar, Varkala, Vizhinjam y Pulicat en Tamil Nadu y Chilka en Orissa.
- Una importante aplicación de las microalgas para reducir la cantidad de CO₂ son las llamadas bio-refinerías. El proceso involucra cultivo masivo de microalgas en tierra, estanques, lagos, ríos, aguas residuales y mares para generar bioenergía para así producir una diversidad de productos incluyendo los biocombustibles con emisiones negativas y potencialmente tratamiento de aguas residuales. Las microalgas se pueden dividir en partes más pequeñas, como proteínas, lípidos y carbohidratos por ello son una opción deseable como materia prima para las biorrefinerías. Las microalgas también se pueden cultivar para la producción masiva de biomasa y pueden crecer

en una variedad de entornos, incluidos estanques, lagos, ríos, aguas residuales y mares (Figura 8). Estos biocombustibles producidos por algas han demostrado ser más efectivos que los obtenidos del aceite de palma. En 2019, la Comisión Europea ya catalogó el aceite de palma como un elemento de alto riesgo de cambio de uso de la tierra y aprobó su eliminación gradual como combustible renovable a 2025 tras la publicación de informe que demostró que los biocarburantes producidos con esta materia prima generan tres y dos veces más emisiones que el diésel fósil.

- Los biocombustibles con emisiones negativas producidos por microalgas han demostrado que son más efectivos que los obtenidos del aceite de palma.

Figura 8: las microalgas como materia prima para las biorrefinerías.



Fuente: tomado de Okeke et al. (2022)

Conclusión y puntos de atención

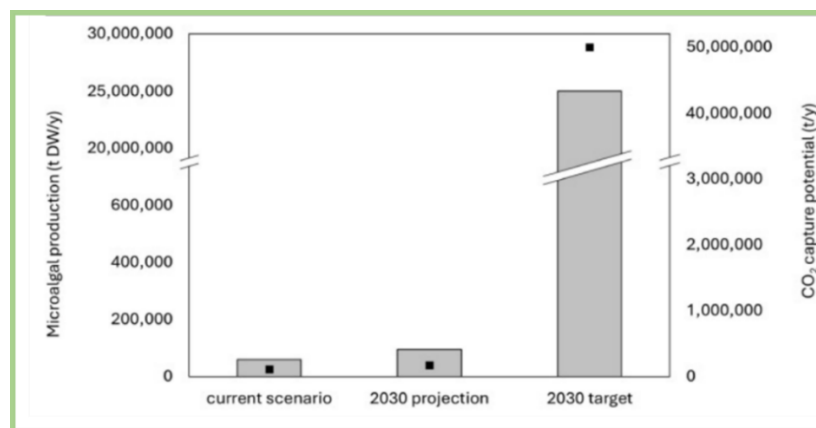
En la búsqueda de un futuro sostenible, no debemos pasar por alto el inmenso potencial de las soluciones basadas en la naturaleza. Dar prioridad a las soluciones basadas en el ecosistema es la mejor apuesta de la humanidad para lograr una captura y almacenamiento sostenibles del

carbono. Además, ya existen y podemos lograr que trabajen con eficiencia. Estas opciones ecológicas, no sólo capturan eficazmente el dióxido de carbono, sino que también favorecen la salud general del ecosistema.

Es muy importante tener en cuenta que no todos los bosques de algas marinas tienen el mismo impacto en la captura de carbono. Su ubicación es un factor determinante. Los bosques de algas marinas en regiones templadas y polares absorben más carbono que aquellos en aguas más cálidas y tropicales. Esto se debe a que las aguas frescas y ricas en nutrientes favorecen el crecimiento de los bosques más altos, lo que los hace más eficientes en la absorción de carbono.

La Figura 9 muestra la producción actual y proyectada de microalgas (representada por barras) y potencial de captura de CO₂ de las microalgas producidas (representadas por cuadrados). El objetivo para 2030 se calculó asumiendo que se producirían suficientes microalgas para capturar 50 Mt de CO₂ por año (Fernandes de Souza et al., 2024).

Figura 9: Producción actual y proyectada de microalgas



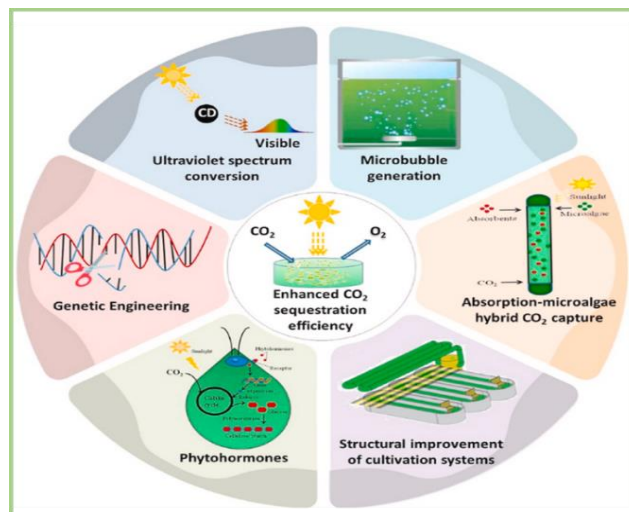
Fuente: tomada de Fernandes de Souza et al. (2024)

La captura biológica de CO₂ a través de microalgas de rápido crecimiento desde fuentes puntuales es uno de los aspectos críticos que en última instancia pueden ayudar a descarbonizar y, por ende, mejorar el calentamiento global. Las microalgas parecen ser un candidato potencial para el secuestro de carbono debido a su naturaleza de rápido crecimiento y mayor eficiencia de fijación de carbono en comparación con las plantas terrestres. Las microalgas pueden crecer en una amplia gama de entornos, pueden cultivarse en tierras no fértiles en aguas residuales y pueden asimilar tanto carbono orgánico como inorgánico. Es importante destacar la importancia

adicional de las algas marinas para la humanidad que incluye alimentación, sectores industriales, área farmacéutica, alimentación animal acuática, cosméticos, textiles y bioempaques entre otros. Mención aparte, su potencial para abordar deficiencias nutricionales comunes, incluyendo hierro, vitamina A, omega-3 y yodo.

La Figura 10 sintetiza cómo optimizar el secuestro de CO₂ de las microalgas, integrar la generación de productos valiosos y explorar a futuro técnicas novedosas como manipulaciones genéticas, fitohormonas, puntos cuánticos y herramientas de inteligencia artificial para mejorar la eficiencia del secuestro de CO₂.

Figura 10: Optimización sintetizada del secuestro del CO₂ de las microalgas



Fuente: tomado de Goswami et al. (2024)

Sin embargo, se requieren recursos para investigación y así responder algunas preguntas fundamentales: ¿Cuántas algas podemos cultivar? ¿Qué se necesitará para asegurar que las algas se hundan en el fondo del océano? ¿Cuánto carbono permanecerá allí el tiempo suficiente para ayudar de verdad al medio ambiente? ¿Cuál sería el Impacto ecológico de depositar miles de millones de toneladas de biomasa muerta en el fondo del mar? ¿Tenemos idea de lo que significará intervenir activamente el sistema marino? El uso de microalgas en bio-refinerías está a un nivel incipiente y se necesita mucha investigación para evaluar su aplicación en gran escala.

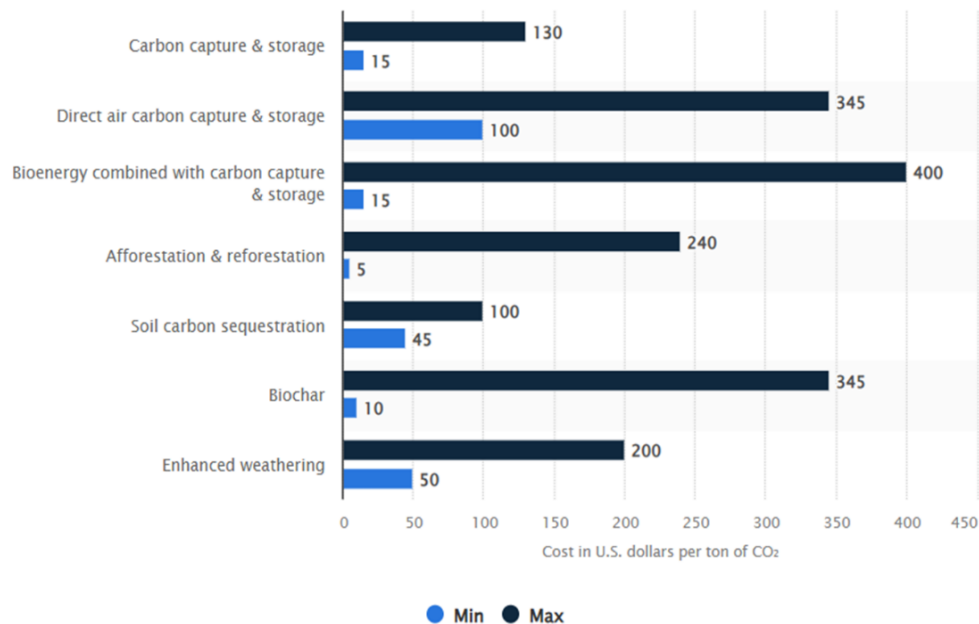
A algunos investigadores también les preocupa el impacto ecológico de sumergir tantas algas. Los bosques flotantes podrían bloquear las rutas de migración de los mamíferos marinos

y quizás llegar a afectar el ecosistema marino. Científicos y ecologistas advierten que no hay que precipitarse y deben destinarse recursos para la investigación científica y medioambiental creando consejos asesores científicos independientes que trabajen en conjunto con empresas privadas y grupos Intergubernamentales de expertos sobre el cambio climático.

Por otra parte, según un estudio de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2020), los cultivos rurales juegan un papel significativo en el secuestro de carbono en el suelo a través de la producción de biomasa y el cuidado de cultivos perennes. Estos estudios son cruciales a la hora de fomentar prácticas agronómicas sostenibles que pueden ayudar a secuestrar carbono. Muchos de estos proyectos adelantados hasta ahora han sido dirigidos por mujeres, quienes han demostrado una alta eficiencia en la dirección de proyectos de captura de carbono. Según el estudio, las mujeres son más propensas a utilizar prácticas de gestión de la tierra sostenibles y a participar en proyectos comunitarios. Las Naciones Unidas también propone en lugar de poner en marcha proyectos e iniciativas completamente nuevos (caros y que aún no se han probado) de cultivo de carbono. Se conoce como cultivo de carbono a una variedad de métodos agrícolas destinados a secuestrar el carbono atmosférico en el suelo y en las raíces, la madera y las hojas de diferentes cultivos. Aumentar el contenido del material orgánico del suelo puede ayudar al crecimiento de las plantas, aumentar el contenido total de carbono, mejorar la capacidad de retención de agua del suelo y reducir el uso de fertilizantes. Quizás, una estrategia más eficaz a corto plazo, es brindar más apoyo a los miles de agricultores y organizaciones que ya se dedican a los cultivos perennes, los cultivos de biomasa, así como sistemas de cultivo y otras prácticas de secuestro de carbono.

Se estima que los costos de la captura y almacenamiento de carbono oscilaron entre 15 y 130 dólares estadounidenses por tonelada métrica de dióxido de carbono (toneladas de CO₂), mientras que los costos de la captura y almacenamiento de carbono directos en el aire oscilaron entre 100 y 345 dólares estadounidenses por tonelada de CO₂. En cambio, las soluciones basadas en la naturaleza, como la forestación y la reforestación, oscilaron entre 45 y 240 dólares estadounidenses por tonelada de CO₂ (Figura 11). El costo del uso de microalgas puede oscilar entre 230 y 920 dólares estadounidenses en sus primeros ensayos (STOREG@A 2025). Sin embargo, es una técnica que está en estado incipiente de desarrollo y a medida que se produzcan nuevos estudios y desarrollos, los costos pueden ser optimizados a futuro.

Figura 11: Costos estimados de la captura de carbono.



Fuente: tomado de Statista (2023)

Referencias

- Algae Planet. (2023). *Algae Planet's Top Ten Algae Stories of 2023*. <https://algaeplanet.com/algaeplanets-top-ten-algae-stories-of-2023/>
- Algae Planet 2023. *Brilliant Planet Update*. <https://algaeplanet.com/brilliant-planet-update/>
- Andrade, A. (2024). San Mateo County Building Decarbonization Strategy 2024-2025. *Civic Well*. <https://civicwell.org/civic-news/currents-smc-building-decarb-strategy/>
- Balan, V.; Pierson, J.; Husain, H.; Kumar, S.; Saffron, C. y Kumar, V. (2023). Potential of using microalgae to sequester carbon dioxide and processing to bioproducts. *Green Chemistry*, Issue 20. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/gc/d3gc02286b/unauth>
- Burt, J. (2023). *Científicos recomiendan el cultivo de algas para luchar contra el cambio climático*. Radio Canadá Internacional. <https://ici.radio-canada.ca/rci/es/noticia/2012900/cientificos-recomiendan-algas-luchar-cambio-climatico>
- Calatayud, M. (2020). *Farming Revolution: Growing algae in southern New Mexico, Luna County*. <https://archleague.org/article/luna-county/>
- Capecchi, F. (2023). New Study Reveals Seaweed's Hidden Climate Benefits. *Sierra Club*. <https://www.sierraclub.org/ecocentro/2023/08/un-nuevo-estudio-revela-los-beneficios-climaticos-ocultos-de-las-algas-marinas>

- Carbon Credits (2022). *Growing Algae in The Desert to Capture Carbon*. https://carboncredits.com/brilliant-planet-carbon-capture-with-algae/?sl=cc-google-ads&gad_source=1&gclid=EAlaQobChMIppTntLKkiAMVUjcIBR1A8ggLEAMYAiAAEglFPD_BwE
- Europa Press Science (2022). *Las algas pardas pueden secuestrar enormes cantidades de CO₂*. <https://www.europapress.es/ciencia/cambio-climatico/noticia-algas-pardas-pueden-secuestrar-enormes-cantidades-CO2-20221223205849.html>
- Fernandes De Souza, M.; Meers, E. y Manguini, S. (2024). The potential of microalgae for carbon capture and sequestration. *EFB Bioeconomy Journal*, Volume 4, November 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667041024000053>
- Fundación Chile (2025). Iniciativa Carbono Azul. <https://fch.cl/iniciativa/carbono-azul/>
- Genomica (2024). *¿Podría el ADN flotante resolver el misterio del carbono de las algas? Sostenibilidad, Algas Marinas*. <https://es.thefishsite.com/articulos/podr%C3%ADa-el-adn-flotante-resolver-el-misterio-del-carbono-de-las-algas>
- Goswami, R. K.; Mehariya, S. y Verma, P. (2024). Advances in microalgae-based carbon sequestration: Current status and future perspectives. *Environmental Research*, Volume 249. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935124003013>
- Greenfield, E. (2022). Papel de las algas en la captura de carbono. *SigmaEarth*. https://sigmaearth.com/es/Papel-de-las-algas-en-la-captura-de-carbono./#google_vignette
- Guajardo, C. (2024). *Carbono azul y el potencial de las algas frente al cambio climático*. Green Network. <https://greennetwork.cl/biodiversidad/carbono-azul-y-el-potencial-de-las-algas-frente-al-cambio-climatico/>
- I'MNOVATION (2024). *Secuestro de carbono: Islandia acogerá la mayor planta de su clase en el mundo*. <https://www.imnovation-hub.com/es/ciencia-y-tecnologia/secuestro-carbono-planta-islandia/>
- Iturra, F. (2024). Primer proyecto de carbono azul en Chile: usan algas para rehabilitar ecosistema marino y reducir CO₂. *Aquí Tierra*. <https://www.biobiochile.cl/especial/aqui-tierra/noticias/2024/01/17/primer-proyecto-de-carbono-azul-en-chile-usan-algas-para-rehabilitar-ecosistema-marino-y-reducir-CO2.shtml>
- Kelp Forest Foundation. Países Bajos (2025). *El cultivo de algas marinas como sumidero de carbono*. <https://oceandecade.org/es/actions/offshore-kelp-cultivation-as-a-carbon%20sink/#:~:text=Las%20algas%20absorben%20grandes%20cantidades,los%201.000%20metros%20de%20%20profundidad>
- Kirby, G. (2023). *Green dreams: algae emerge as a game-changer in the race to net zero*. Australia's National Science Agency. <https://www.csiro.au/en/news/all/articles/2023/october/algae-slashing-emissions>
- Koka, J. (2022). How can we further reduce CO₂ emissions? New study reveals algae can help. *Argonne National Laboratory*. <https://www.anl.gov/article/how-can-we-further-reduce-CO2-emissions-new-study-reveals-algae-can-help>

- La actualidad canadiense en siete lenguas (2023). *Científicos recomiendan el cultivo de algas para luchar contra el cambio climático*. <https://ici.radio-canada.ca/rci/es/noticia/2012900/cientificos-recomiendan-algas-luchar-cambio-climatico>
- Lindsey, R. (2024). *Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide*. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>
- Okeke, E., Ejeromedoghene, O., Okoye, C., Prince, T., Ezeorba, C., Nyaruaba, R., Ikechukwu, C., Oladipo, A. & Orege, J. (2022). Microalgae biorefinery: An integrated route for the sustainable production of high-value-added products. *Energy Conversion and Management*, Volume 16. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174522001465>
- Onyeaka, H., Miri, T., Obileke, K., Hart, A., Anumudu, C. & Al-Sharify, Z. (2021). Minimizing carbon footprint via microalgae as a biological capture. *Carbon Capture Science & Technology*, Volume 1. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772656821000075#:~:text=It%20has%20been%20reported%20that,ecosystem%20could%20be%20slowed%20down>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2020). *Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales de la FAO. Una nueva perspectiva 2020*. <https://www.fao.org/interactive/forest-resources-assessment/2020/es/>
- Page, T. (2023). *Cultivar y enterrar algas en el Sahara, una solución novedosa contra la crisis climática*. CNN Mundo. <https://cnnespanol.cnn.com/2023/08/18/cultivar-enterrar-algas-sahara-CO2-crisis-climatica-trax>
- San Mateo County Carbon (2022). *Sequestration with Algae Some types of algae can take carbon from the atmosphere*. https://sustainableanmateo.org/wp-content/uploads/2024/01/Carbon-Sequestration-with-Algae_202209.pdf
- Statista (2025). *Nivel promedio de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera entre 1959 y 2023*. Energía y Medio Ambiente. <https://es.statista.com/estadisticas/1269928/concentracion-atmosferica-global-de-dioxido-de-carbono/>
- Statista (2023). *Estimated cost ranges for carbon capture and storage (CSS) and carbon dioxide removal (CDR) solutions as of 2023, by approach or technology*. Energy & Environment, Environmental Technology & Greentech. <https://www.statista.com/statistics/1304575/global-carbon-capture-cost-by-technology/>
- STOREG@A (2025). *Microalgae Global Market Report 2025*. <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/microalgae-global-market-report>
- STOREG@A (2025). *Analysis: Carbon Capture Methods, Compared*. <https://storegga.earth/blog/carbon-capture-methods-compared>
- Strong, S. (2023). Research Advances Toward Goal of Net Zero Carbon Emissions. *Science, Energy and Innovation*, University of Houston. <https://uh.edu/news-events/stories/2023/october-2023/10252023-algae-climate-CO2algae-climate-CO2.php>
- World Economic Forum (2025). *Tres soluciones basadas en la naturaleza para secuestrar carbono hoy*. <https://es.weforum.org/stories/2023/10/3-soluciones-basadas-en-la-naturaleza-para-secuestrar-carbono-ahora-mismo/>

Declaración de conflicto de interés y originalidad

Conforme a lo estipulado en el *Código de ética y buenas prácticas* publicado en **PetroRenova Indexed, Revista Científica de la Energía**, la autora **Castro Mora, Marianto**, declara al *Comité Editorial* que no tiene situaciones que representen conflicto de interés real, potencial o evidente, de carácter académico, financiero, intelectual o con derechos de propiedad intelectual relacionados con el contenido del artículo: **Potencial de las algas y la naturaleza en el secuestro de carbono**, en relación con su publicación. De igual manera, declara que el trabajo es original, no ha sido publicado parcial ni totalmente en otro medio de difusión, no se utilizaron ideas, formulaciones, citas o ilustraciones diversas, extraídas de distintas fuentes, sin mencionar de forma clara y estricta su origen y sin ser referenciadas debidamente en la bibliografía correspondiente. Consiente que el Comité Editorial aplique cualquier sistema de detección de plagio para verificar su originalidad.

Para citar este artículo (APA):

Castro Mora, M. (2025). Potencial de las algas y la naturaleza en el secuestro de carbono. *PetroRenova, Revista Científica de la Energía*. Vol. 1, núm. 1, abril-junio, 2025. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15643128>

Uso del hidrogeno y del amoniaco como combustible en turbinas de gas para la industria del petróleo, gas, petroquímica y generación eléctrica

Use of hydrogen and ammonia as fuel in gas turbines for the oil, gas, petrochemical and power generation industries

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15643159>

Recibido: 2025-01-23 Aceptado: 2025-03-07

Martinez Llaurado, Luis Alberto¹

Correo: llaurodoluisalberto@gmail.com

albertomtzzllaurado@turbomachinery-consulting.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-3067-9584>

Resumen

El uso del hidrógeno y el amoníaco como combustibles en turbinas de gas representa una alternativa prometedora para la reducción de emisiones en la industria del petróleo, gas y generación eléctrica. Este estudio analiza su aplicación, avances tecnológicos y desafíos, incluyendo el impacto en materiales, emisiones de CO₂ y seguridad en almacenamiento y transporte. Se han desarrollado turbinas capaces de operar con mezclas de hidrógeno, amoníaco y gas natural, con miras a alcanzar el 100% de hidrógeno. Sin embargo, la fragilización por hidrógeno, la corrosión por amoníaco y la infraestructura limitada siguen siendo retos clave. El amoníaco surge como un vector energético viable, aunque su toxicidad requiere manejo especializado. A pesar de los avances, la viabilidad económica depende de la reducción de costos en la producción de hidrógeno verde y del desarrollo de normativas adecuadas. Se recomienda seguir investigando materiales resistentes y optimizar tecnologías de combustión para mejorar eficiencia y reducir impactos ambientales.

Palabras clave: turbinas de gas, hidrogeno, amoniaco, emisiones CO₂

Abstract

The use of hydrogen and ammonia as fuels in gas turbines represents a promising alternative for reducing emissions in the oil, gas, and power generation industries. This study analyzes their application, technological advancements, and challenges, including the impact on materials, CO₂ emissions, and safety in storage and transportation. Turbines capable of operating with hydrogen, ammonia, and natural gas mixtures have been developed, aiming to reach 100% hydrogen operation. However, hydrogen embrittlement, ammonia corrosion, and limited infrastructure remain key challenges. Ammonia emerges as a viable energy carrier, although its toxicity requires specialized handling. Despite advancements, economic feasibility depends on

¹ Ing. Mecánico con estudios de Maestría en Equipos Rotativos. Consultor independiente. Venezuela.

reducing costs in green hydrogen production and developing appropriate regulations. Further research on resistant materials and the optimization of combustion technologies is recommended to improve efficiency and reduce environmental impacts.

Keywords: gas turbines, hydrogen, ammonia, CO2 emissions

Introducción

El uso del hidrógeno (H₂) y del amoníaco (NH₃) como combustibles en turbinas de gas representa una de las innovaciones más prometedoras en la generación de potencia y en la reducción de emisiones en la industria del petróleo, gas y petroquímica. Con el avance de la transición energética, se han desarrollado nuevas tecnologías para integrar estos combustibles en turbinas de gas de distintos tamaños, desde microturbinas hasta unidades aeroderivadas e industriales de gran escala. Este informe técnico analiza los avances, limitaciones y aplicaciones recientes en el uso del hidrógeno y el amoníaco como combustibles en turbinas de gas hasta el presente año 2025.

1. Importancia del hidrógeno y del amoníaco en la industria

1.1 ¿Qué son y por qué son relevantes?

El hidrógeno y el amoníaco han emergido como combustibles clave debido a su potencial para reducir las emisiones de carbono en la generación de potencia. El hidrógeno es un combustible con alta densidad energética por unidad de masa y su combustión solo produce vapor de agua. El amoníaco, por otro lado, es un portador de hidrógeno que puede ser utilizado directamente en combustión o reformado para producir hidrógeno in situ.

1.2 ¿Cómo se utilizan en las turbinas de gas?

Ambos combustibles pueden ser usados en turbinas de gas mediante:

- *Mezclas con gas natural:* Hidrógeno mezclado con gas natural en proporciones del 5-50% ha sido utilizado en turbinas industriales para reducir emisiones de CO₂.
- *Combustión directa:* Turbinas diseñadas para operar con 100% hidrógeno están en fase de desarrollo.
- *Uso de amoníaco:* Se investiga su uso como combustible directo en turbinas o como fuente de hidrógeno mediante reformado catalítico.

1.3 ¿Cuándo se espera su implementación a gran escala?

Desde 2023 hasta 2030 se espera un crecimiento progresivo de su uso, impulsado por normativas de descarbonización y avances en materiales y diseño de cámaras de combustión adaptadas a estos combustibles.

1.4 ¿Para qué se están desarrollando estas tecnologías?

- Reducción de emisiones en plantas petroquímicas.
- Generación de electricidad en refinerías y complejos industriales.
- Almacenamiento de energía a gran escala mediante hidrógeno.

2. Avances tecnológicos recientes (2020 - 2025)

2.1. Turbinas aeroderivadas y de ciclo combinado

Empresas como General Electric (GE), Mitsubishi Power y Siemens Energy (entre otras) han desarrollado turbinas capaces de operar con mezclas de hasta 50% hidrógeno y con miras a alcanzar el 100% para 2030.

- *GE HA Series*: Turbinas como la 7HA.03 han sido probadas con hidrógeno, demostrando reducción significativa de emisiones de CO₂.
- *Mitsubishi JAC Series*: En pruebas para operar con 100% hidrógeno.

2.2. Microturbinas y turbinas de pequeña escala

Las microturbinas han mostrado eficiencia en generación distribuida con hidrógeno, como las Capstone C200 con capacidades de operar con mezclas ricas en hidrógeno.

3. Desafíos técnicos en el uso de hidrógeno y amoníaco

3.1. Materiales resistentes a alta temperatura

Uno de los principales desafíos en el uso de hidrógeno y amoníaco es la selección de materiales adecuados para los equipos y tuberías que estarán en contacto con estos gases.

- *Corrosión por hidrógeno*: El hidrógeno puede provocar un fenómeno conocido como fragilización por hidrógeno, donde los átomos de hidrógeno penetran en los metales, debilitando su estructura y causando fallas prematuras. Este efecto es especialmente problemático en aceros de alta resistencia y aleaciones metálicas utilizadas en turbinas y tuberías de alta presión.
- *Ataque químico del amoníaco*: El amoníaco, especialmente en presencia de humedad, puede reaccionar con algunos materiales metálicos, causando fisuración inducida por amoníaco (SCC, por sus siglas en inglés). Este tipo de corrosión es común en cobre, latón y ciertas aleaciones de acero, por lo que es fundamental seleccionar materiales resistentes, como aceros inoxidables específicos o recubrimientos protectores.

3.2. Control de emisiones de NOx

La combustión de hidrógeno presenta un reto adicional en la generación de **óxidos de nitrógeno (NOx)**, contaminantes que contribuyen a la lluvia ácida y al smog.

- *Mayor temperatura de llama*: El hidrógeno arde a temperaturas más altas que los combustibles fósiles convencionales, lo que favorece la reacción entre el nitrógeno y el oxígeno del aire, formando más NOx.
- *Estrategias de control*:
 - *Combustión pobre*: Se reduce la cantidad de combustible en la mezcla para disminuir la temperatura de la llama y, con ello, la formación de NOx.
 - *Inyección de amoníaco*: En algunos sistemas, el amoníaco puede utilizarse como agente reductor en sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR), donde reacciona con los NOx y los convierte en nitrógeno molecular (N₂) y agua, reduciendo la contaminación.

3.3. Seguridad y almacenamiento

El almacenamiento y manejo de hidrógeno y amoníaco presentan desafíos técnicos y de seguridad distintos:

- *Hidrógeno:*

- Debe almacenarse a altas presiones (generalmente entre 350 y 700 bar) en cilindros o tanques reforzados.
- Alternativamente, puede almacenarse en estado líquido, lo que requiere temperaturas criogénicas (-253 °C), aumentando la complejidad del almacenamiento y transporte.
- Es altamente inflamable y puede formar mezclas explosivas con el aire, por lo que se requieren estrictas medidas de seguridad.

- *Amoníaco:*

- Es tóxico y puede causar irritación severa en la piel, ojos y sistema respiratorio si se libera accidentalmente.
- Su almacenamiento se realiza típicamente en estado líquido, a presiones moderadas (entre 10 y 15 bar a temperatura ambiente).
- Es corrosivo para ciertos materiales y puede generar **riesgos ambientales** si hay fugas, ya que es soluble en agua y puede contaminar fuentes de agua.

4. Limitaciones y retos industriales

El uso de hidrógeno y amoníaco como combustibles en la industria enfrenta varios desafíos técnicos y económicos que deben abordarse para lograr una implementación efectiva y segura.

4.1. Diseño y construcción

- *Desarrollo de nuevos combustores adaptados a hidrógeno puro*

Los combustores tradicionales en turbinas de gas y motores industriales están diseñados para combustibles fósiles como gas natural y diésel. La adaptación para hidrógeno puro presenta los siguientes retos:

Mayor temperatura de llama: El hidrógeno quema a temperaturas más altas que el gas natural, lo que puede generar mayores niveles de NOx y requerir sistemas avanzados de enfriamiento y control de emisiones.

Velocidad de combustión: El hidrógeno tiene una velocidad de llama más alta, lo que puede aumentar el riesgo de combustión inestable o detonaciones en el interior del combustor.

Compatibilidad con sistemas existentes: Se requieren modificaciones en inyectores y sistemas de mezcla aire-combustible para garantizar una combustión eficiente y segura.

- *Integración de materiales avanzados resistentes a la fragilización por hidrógeno*

El hidrógeno puede provocar fragilización en materiales metálicos, lo que reduce su resistencia mecánica y puede generar fallas estructurales en tuberías, válvulas y turbinas.

Se necesitan aleaciones avanzadas, como aceros inoxidables de alta resistencia, aleaciones de níquel o recubrimientos protectores para evitar la absorción de hidrógeno.

Los métodos de fabricación y soldadura deben ser optimizados para minimizar la presencia de defectos que puedan acelerar la fragilización.

4.2. Infraestructura y regulaciones

- *Creación de redes de transporte de hidrógeno y amoníaco*

El transporte de hidrógeno y amoníaco a gran escala requiere nuevas infraestructuras:

Gasoductos de hidrógeno: Se deben construir tuberías diseñadas específicamente para hidrógeno, ya que el gas puede causar fugas y degradación en tuberías de acero convencionales debido a su baja densidad y alta permeabilidad.

Conversión de infraestructura existente: Algunos estudios analizan la posibilidad de mezclar hidrógeno con gas natural en gasoductos actuales, pero esto presenta límites de concentración debido a riesgos de fragilización de materiales y cambios en la eficiencia de combustión.

Transporte de amoníaco: El amoníaco es más fácil de transportar que el hidrógeno debido a su mayor densidad energética y menor presión de almacenamiento, lo que lo convierte en un vector energético viable. Sin embargo, su toxicidad requiere protocolos de manejo seguros.

- *Estándares de seguridad para almacenamiento y distribución*

Se necesitan normativas estrictas para regular el almacenamiento y manejo de hidrógeno y amoníaco, minimizando riesgos de explosión y exposición a sustancias tóxicas.

La certificación de materiales y componentes debe asegurar que sean adecuados para operar con estos gases bajo diferentes condiciones de temperatura y presión.

4.3. Costo y viabilidad económica

- *Producción de hidrógeno verde sigue siendo costosa*

El hidrógeno verde (producido mediante electrólisis con energía renovable) es actualmente más caro que el hidrógeno gris (obtenido de gas natural) y los combustibles fósiles.

Los costos de producción dependen de factores como la eficiencia de los electrolizadores y la disponibilidad de electricidad renovable barata.

Se requieren incentivos gubernamentales y economías de escala para reducir costos y hacer competitivo el hidrógeno verde en el mercado energético.

- *Amoníaco como alternativa más estable para almacenamiento y transporte*

Dado que el hidrógeno es difícil de almacenar y transportar en grandes volúmenes debido a su baja densidad, el amoníaco surge como una alternativa viable:

Puede transportarse en estado líquido a presiones moderadas y temperaturas manejables, a diferencia del hidrógeno líquido, que requiere -253 °C.

Puede utilizarse directamente como combustible en ciertos sistemas o reconvertirse en hidrógeno mediante procesos de cracking en el punto de uso.

Sin embargo, su toxicidad y corrosividad requieren infraestructura y regulaciones especializadas para su manipulación segura.

Recomendaciones

El hidrógeno y el amoníaco son combustibles prometedores para la descarbonización de la industria de generación de potencia.

Los avances en turbinas de gas han demostrado viabilidad técnica, pero persisten desafíos en infraestructura y costos.

Es necesario continuar con el desarrollo de materiales y estrategias de combustión para reducir NOx.

Se recomienda mayor inversión en producción de hidrógeno verde y desarrollo de turbinas adaptadas a estos combustibles.

Referencias

- Capstone Turbine Corporation. (2023). *Microturbines and Hydrogen Fuel*. Technical Report.
- Gas Turbine World (2022). *Green H2 powering gas turbines: Realistic strategy?* by S. C. Gulen.
- GE Gas Power. (2024). *Hydrogen-Ready Gas Turbines*. Retrieved from [GE Power Website].
- Mitsubishi Power (2025). Mitsubishi power commences development of World's first Ammonia-fired 40 MW class Gas turbine System—Targets to expand lineup of carbon-free power generation options, with commercialization around 2025
- Mitsubishi Power. (2023). Advances in Hydrogen Combustion Turbines. *Journal of Power Engineering*.
- SEA-LNG (2021). *Understanding energy density of future fuels could be key to clearer decarbonization decision making*.
- Siemens Energy. (2024). *Ammonia as a Fuel in Gas Turbines*. White Paper.
- US Department of Energy. (2024). *Hydrogen and Ammonia for Power Generation*. Research Publication.
- Bonasio, V. and Ravelli, S. (2022). Performance analysis of ammonia-fueled micro gas turbine.

Declaración de conflicto de interés y originalidad

Conforme a lo estipulado en el *Código de ética y buenas prácticas* publicado en **PetroRenova Indexed, Revista Científica de la Energía**, el autor **Martínez Llaurado, Luis Alberto**, declara al Comité Editorial que no tiene situaciones que representen conflicto de interés real, potencial o evidente, de carácter académico, financiero, intelectual o con derechos de propiedad intelectual relacionados con el contenido del artículo: **Uso del hidrógeno y del amoníaco como combustible en turbinas de gas para la industria del petróleo, gas, petroquímica y**

Uso del hidrógeno y del amoníaco como combustible en turbinas de gas para la industria del petróleo, gas, petroquímica y generación eléctrica

Martínez Llaurado, Luis Alberto

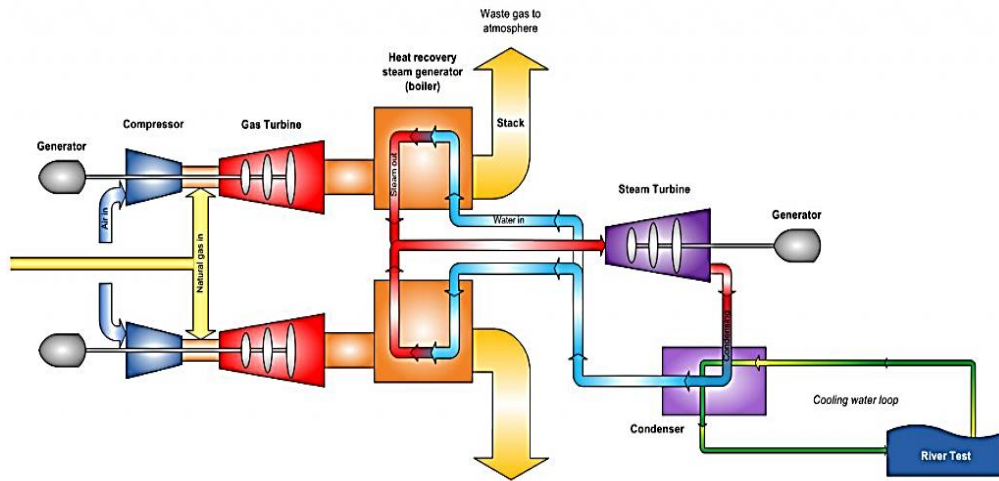
generación eléctrica, en relación con su publicación. De igual manera, declara que el trabajo es original, no ha sido publicado parcial ni totalmente en otro medio de difusión, no se utilizaron ideas, formulaciones, citas o ilustraciones diversas, extraídas de distintas fuentes, sin mencionar de forma clara y estricta su origen y sin ser referenciadas debidamente en la bibliografía correspondiente. Consiente que el Comité Editorial aplique cualquier sistema de detección de plagio para verificar su originalidad.

Para citar este artículo (APA):

Martínez, L. (2025). Uso del hidrógeno y del amoníaco como combustible en turbinas de gas para la industria del petróleo, gas, petroquímica y generación eléctrica. *PetroRenova, Revista Científica de la Energía*. Vol. 1, núm. 1, abril-junio, 2025. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15643159>

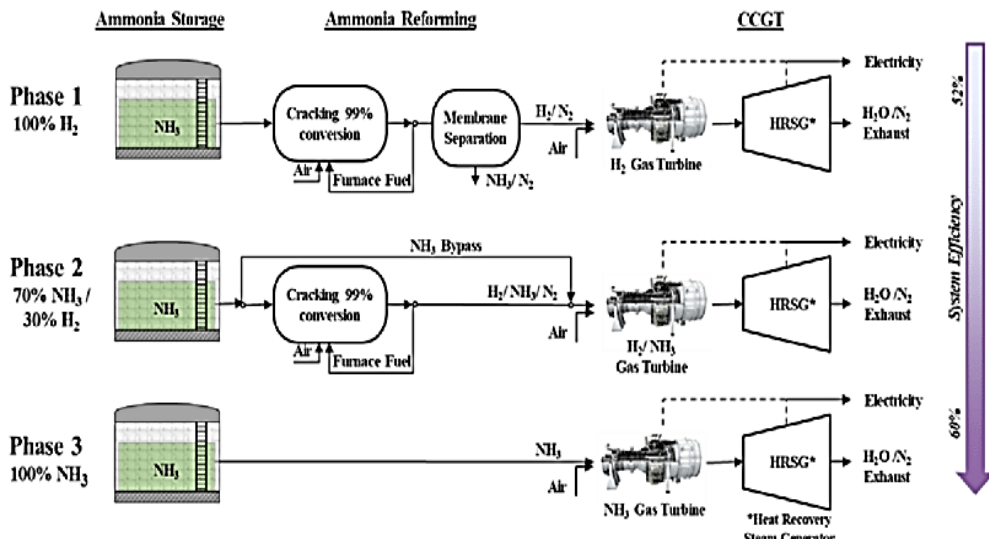
Anexo

Figura 1: Esquema del proceso de combustión de hidrógeno y amoníaco en turbinas de gas.



Nota: descripción general de una turbina de gas de ciclo combinado, con dos turbinas de gas y una turbina de vapor.

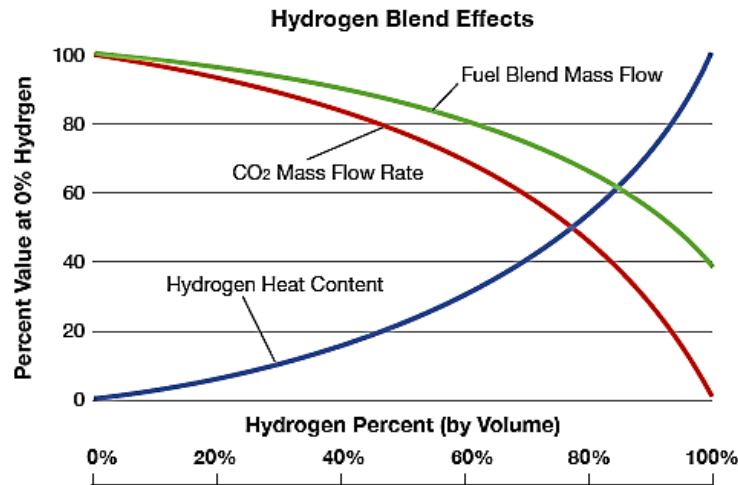
Fuente: Marchwood Power Station operates a combined cycle gas turbine (CCGT) process to produce electricity, 2024.



Nota: AMMONIA-TO-POWER: Configuraciones de CCGT con amoníaco como combustible, modeladas en tres casos: 100% H₂, 70% NH₃ / 30% H₂ y 100% NH₃

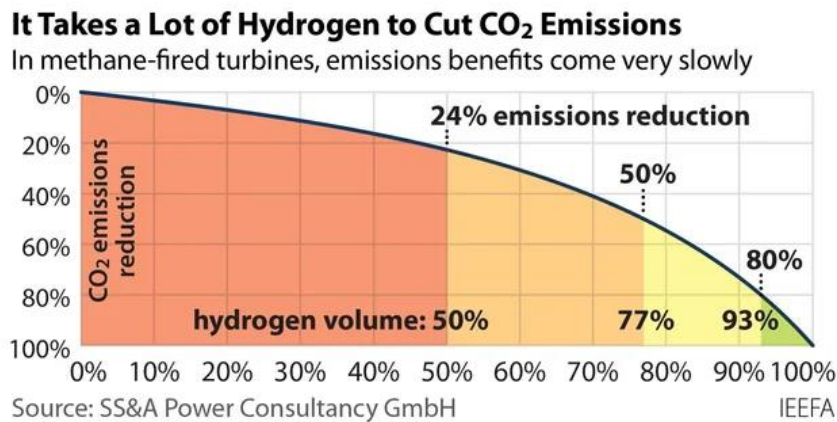
Fuente-Article: Zac Cesaro, Mathew C Ives, Richard Nayak, Rene Bañares-Alcantara, 2021.

Figura 2: Comparación de emisiones entre gas natural, hidrógeno y amoníaco en turbinas de gas.



Nota: Relación de las emisiones de CO₂ con la mezcla de hidrógeno y gas natural como combustible. Las curvas muestran relaciones paramétricas con el aumento del contenido de hidrógeno, donde el eje Y representa el porcentaje en relación con el valor a 100% gas natural (0% H₂). Se observa que un 50% de hidrógeno reduce aproximadamente un 20% las emisiones de CO₂ y aporta alrededor del 20% del contenido de calor del combustible. Para la misma entrada de energía, el flujo másico de combustible con 100% H₂ es el 40% del correspondiente a 100% gas natural.

Fuente- Article: Green H₂ powering gas turbines: Realistic strategy? by S. C. Gulen, Gas Turbine World, 2022.



Nota: Volumen de Hidrogeno requerido en la combustión de las turbinas a gas y su efecto sobre la reducción del contenido de CO₂ en las emisiones de los gases de escape.

Fuente: SS&A Power Consultancy GmbH, by IEEFA (Institute for Energy Economics and Financial Analysis), 2024.

Figura 3: Características y propiedades del H₂ y el Amoníaco para su uso en turbinas de gas.

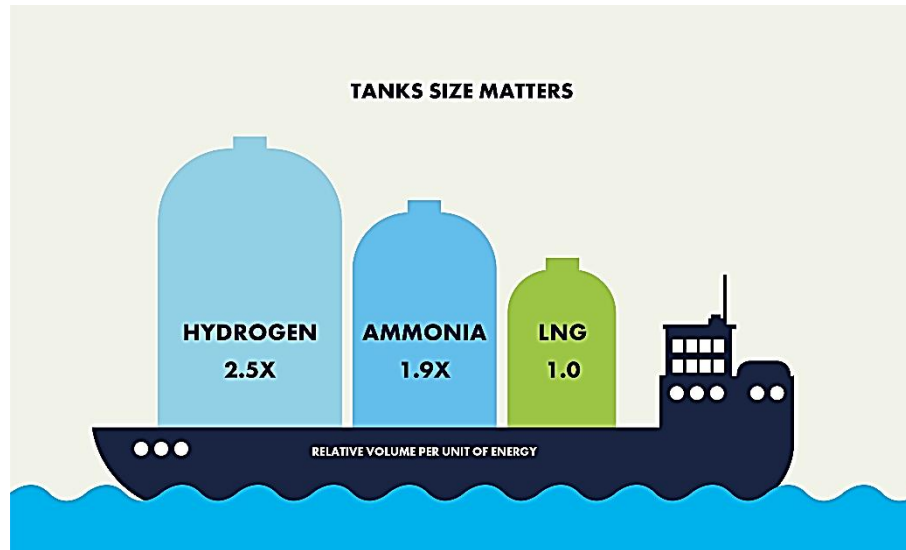
	Hydrogen H ₂	Methane CH ₄	Ammonia NH ₃
Physical Properties			
Size, Kinetic Diameter, nm	0.12	0.38	0.37
Molecular Weight (lb/lb-mole)	2.02	16.04	17.03
Boiling Point (BP), (°F @14.7 psi)	-423	-259	-28
Liquid Density, (@ BP & 14.7 psi), lb/ft ³	4.4	26.4	43.4
Gas Heating Values			
Gas Lower Heating Value (LHV), Btu/ft ³	274	909	359
Gas Higher Heating Value (HHV), Btu/ft ³	324	1,010	433
Liquid Energy Density Volumetric, LHV (Btu/ft ³)	228	564	303
Energy Density Gravimetric, LHV Btu/lb. (Note 1)	51,591	21,496	7,997
Flammability			
Flammability Upper Limit in Air, %	74	15	27
Flammability Lower Limit in Air, %	4	5	16
Auto-ignition Temperature, °F	952	1,076	1,204

Property	Hydrogen	Comparison
Density (gaseous)	0.089 kg/m ³ (0°C, 1 bar)	1/10 of natural gas
Density (liquid)	70.79 kg/m ³ (-253°C, 1 bar)	1/6 of natural gas
Boiling point	-252.76°C (1 bar)	90°C below LNG
Energy per unit of mass (LHV)	120.1 MJ/kg	3x that of gasoline
Energy density (ambient cond., LHV)	0.01 MJ/L	1/3 of natural gas
Specific energy (liquefied, LHV)	8.5 MJ/L	1/3 of LNG
Flame velocity	346 cm/s	8x methane
Ignition range	4–77 vol% in air	6x wider than methane
Autoignition temperature	585°C	220°C for gasoline
Ignition energy	0.02MJ	1/10 of methane

Nota: Comparación entre las diferentes propiedades y características físicas y químicas del Gas Natural respecto al Hidrogeno.

Fuente-Article: Hydrogen: Not a solution for Gas-Fired Turbines, by IEEEFA, Dennis Wamsted, Aug. 2024.

Figura 4: Transporte, uso y Aplicación del H₂ y el Amoníaco en turbinas de gas.



Nota: Ilustración del volumen relativo que ocupan el GNL, el amoníaco y el Hidrógeno por unidad de energía producida en el transporte marítimo.

Fuente-Article: Understanding energy density of future fuels could be key to clearer decarbonization decision making, by SEA-LNG, 2021.

Figura 5: Ejemplos del uso del H₂ y Amoniaco en turbinas de gas actuales en el mercado

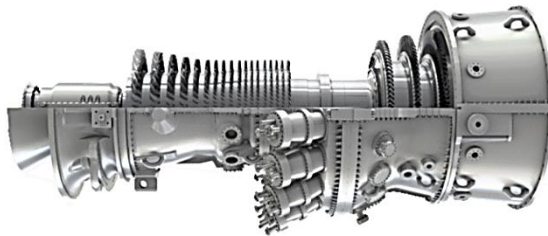


Nota: YOKOHAMA, JAPAN (March 1, 2021) - Mitsubishi Power, a subsidiary of Mitsubishi Heavy Industries (MHI) Group, has commenced development of a 40-megawatt (MW) class gas turbine that is fueled by 100% ammonia (NH₃).

Fuente – Article: Mitsubishi power commences development of World's first Ammonia-fired 40 MW class Gas turbine System—Targets to expand lineup of carbon-free power generation options, with commercialization around 2025, by Mitsubishi power, 2025

Joint goals: F-class technology readiness by 2030

Up to 100%	Retrofittable	NOx emission
2-Stages (Rich & Lean) combustion system	Reduced investment & same life as existing	Comply with stringent emission requirement (lower single digit ppm)
✓ Configured to burn up to 100% of ammonia @ normal operation with 99+% GHG reduction	✓ Utilize existing power plant assets with smaller modification for fuel conversion from natural gas to ammonia	✓ New combustion technology with conventional NOx after treatment systems
✓ Start-up with Natural Gas or carbon neutral fuel	✓ Target to maintain component durability and existing F-class life	✓ Target to meet Japan's regulation for NOx



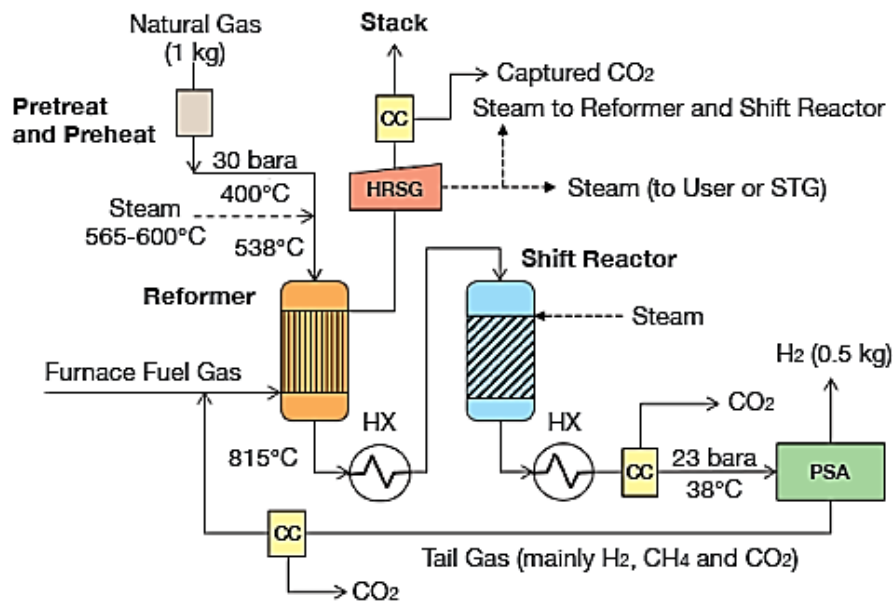
© 2024 GE Vernova Corporation All Rights Reserved.
© 2024 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved. GE and the GE Monogram are trademarks of General Electric Company used under trademark license.

7

Nota: Overview of GE Vernova's technology development for ammonia-fueled gas turbines.

Fuente-Article: from Jeff Goldmeier, *Ammonia Gas Turbine Update* (Nov 2024), by Ammonia Energy Association.

Figura 6: Diagrama de flujo del proceso y esquemáticos de conversión de amoníaco y del gas natural en hidrógeno para su uso en turbinas de gas.

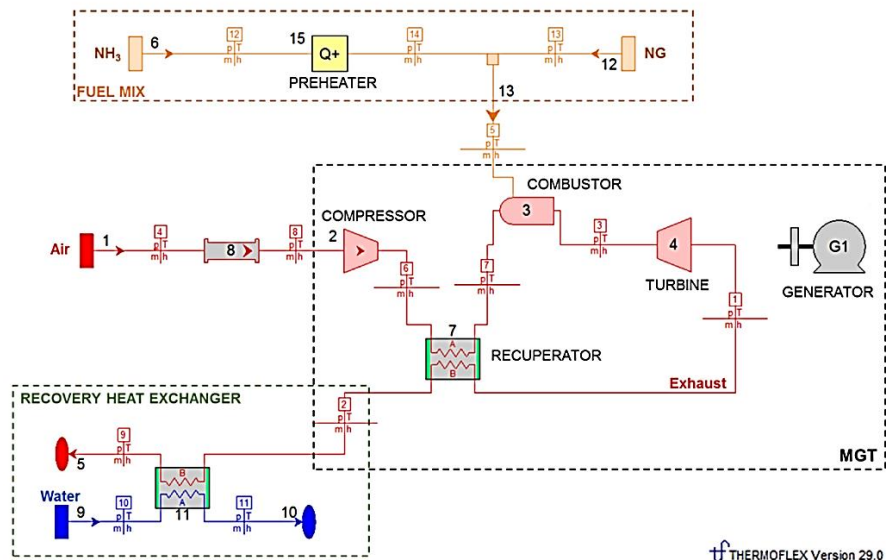


Nota: Reformado de metano con captura de carbono. El diagrama de flujo simplificado muestra el procesamiento de 1 kg de gas natural para producir 0.5 kg de hidrógeno. El CO₂ asociado generado por las reacciones de reformado y cambio de gas es de 5.5 kg por kg de H₂. El CO₂ adicional proveniente de la combustión del combustible en el horno del reformador eleva el total a un rango de 9 a 11 kg de CO₂ por kg de H₂, dependiendo de la eficiencia del proceso. Se muestran un total de tres estaciones de captura de carbono (CC). La unidad de adsorción por cambio de presión (PSA) separa el hidrógeno puro del gas residual, el cual se recicla en el horno del reformador.

Fuente-Article: Green H₂ powering gas turbines: Realistic strategy? by S. C. Gulen, Gas Turbine World, 2022.

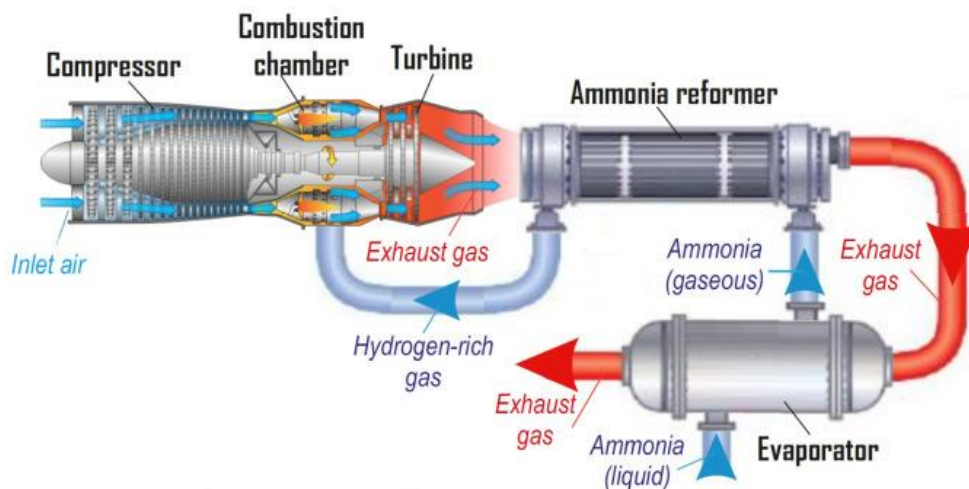
Uso del hidrógeno y del amoníaco como combustible en turbinas de gas para la industria del petróleo, gas, petroquímica y generación eléctrica

Martínez Llauro, Luis Alberto



Nota: Disposición del sistema de la combustión en una microturbina de gas.

Fuente-Article: Performance analysis of ammonia-fueled micro gas turbine, by Vittorio Bonasio and Silvia Ravelli, 2022.



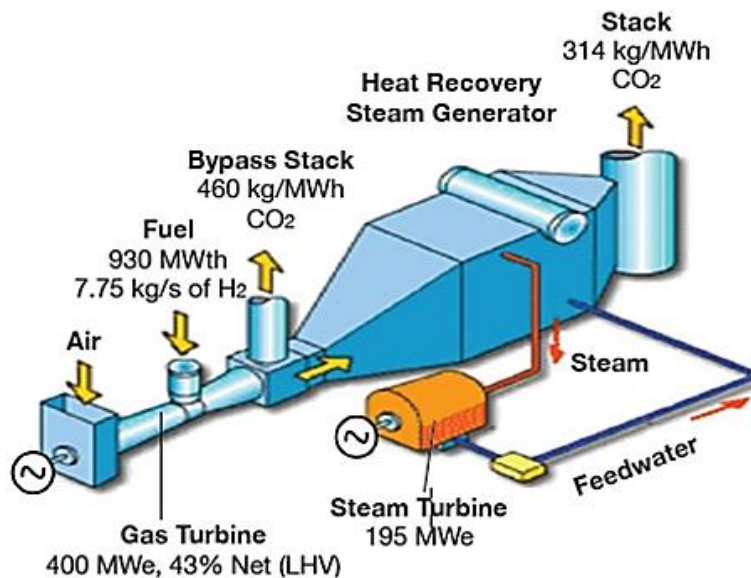
Nota: Representación de un sistema de combustión rico en Hidrogeno a partir del uso de amoníaco líquido para las turbinas de gas.

Fuente-Article: Ammonia fired gas turbines: Recent advances and future perspectives, by Dimitry Pashchenko, 2024.

PetroRenova Indexed. Revista Científica de la Energía

Vol. 1, núm. 1, 36-52, abril-junio, 2025.

ISSN-e: 3080-6666/Maracaibo (4005), Zulia - Venezuela



Nota: Planta de ciclo combinado nominal de 600 MW. Esquema simplificado de una planta de ciclo combinado 1×1 impulsada por una turbina de gas de clase avanzada de 400 MW. Los datos representan el caso de un combustible 100% hidrógeno (7.75 kg/s de H₂). La intensidad de carbono para una turbina de gas en ciclo simple es de 460 kg/MWh de CO₂, casi un 50% mayor que la del ciclo combinado.

Fuente-Article: Green H₂ powering gas turbines: Realistic strategy? by S. C. Gulen, Gas Turbine World, 2022.

Predicción de la concentración de hidrógeno en un reactor de polimerización basado en machine learning

Hydrogen concentration prediction in a polymerization reactor based on machine learning

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15643200>

Recibido: 2025-01-23 Aceptado: 2025-03-08

Sabino Montero, Karla Valentina¹

Correo: karlavsm6@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-5853-4550>

Noguera Hernández, José Ricardo²

Correo: joserickardo95@hotmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-1636-7823>

Resumen

Se modeló la concentración de hidrógeno en un reactor de polimerización a través de Machine Learning en Python. Se emplearon métodos de preprocesamiento de datos (variables rezagadas, limpieza y detección de valores atípicos). Se aplicaron técnicas estadísticas para la visualización de correlación de variables a través de Heatmap. Se ajustaron los modelos Linear Regression, ARIMAX y GBR, obteniendo correlaciones de 0.7950, 0.6722 y 0.6395 respectivamente. Se seleccionó el modelo predictivo de Linear Regression por su mayor correlación, y se obtuvo una mejora del 14.96 % mediante agrupación de observaciones. Para el análisis de sensibilidad, se obtuvo un valor de predicción de la concentración de 0.65 y 0.44 para valores de 3 y 2 kg/h de flujo de hidrógeno crudo, respectivamente, con relación positiva en la variación del mismo. Los resultados confirman la efectividad del aprendizaje automático en el análisis predictivo de procesos industriales.

Palabras clave: python, aprendizaje automático, análisis predictivo, inteligencia artificial.

Abstract

The concentration of hydrogen in a polymerization reactor was modeled using Machine Learning in Python. Data preprocessing methods (lagged variables, cleaning, and outlier detection) were employed. Statistical techniques were applied for visualization of variable correlation using Heatmap. Linear Regression, ARIMAX and GBR models were adjusted, obtaining correlations of 0.7950, 0.6722 and 0.6395 respectively. Linear Regression predictive model was selected for its higher correlation, and a 14.96% improvement was obtained through observation grouping. For sensitivity analysis, concentration prediction was achieved with values of 0.65 and 0.44 for 3 and 2 kg/h raw hydrogen flow, respectively, showing a positive relationship with its variation. The

¹ Ingeniero Químico, Altamar Trading, C.A., Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo, Venezuela.

² Ingeniero Químico, Polipropileno de Venezuela, Propilven S.A., La Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.

results confirm the effectiveness of Machine Learning in the predictive analysis of industrial processes.

Keywords: python, machine learning, predictive analysis, artificial intelligence

Introducción

La Inteligencia Artificial (IA) es un campo de la informática que se ha convertido en un pilar fundamental para transformar grandes volúmenes de datos en información valiosa. Un subconjunto de la IA es el aprendizaje automático, que permite procesar grandes cantidades de datos de entrada para resolver problemas de modelado, lo que ofrece una visión de posibles futuros (Dubravova et al., 2024). A nivel mundial, el Machine Learning ha proporcionado diferentes técnicas o algoritmos para predecir situaciones de acuerdo con grandes cantidades de información que, a través de un buen procesamiento y filtrado de datos, pueden generar predicciones muy efectivas (Forero-Corba y Negre, 2024). Los modelos predictivos son herramientas estadísticas diseñadas para identificar patrones y relaciones, proporcionando la capacidad de anticipar comportamientos futuros en función del entrenamiento de datos históricos. Estas capacidades predictivas son fundamentales para la toma de decisiones en múltiples disciplinas.

En este contexto, la versatilidad y simplicidad del lenguaje de programación Python, son de utilidad para el procesamiento de datos y el ajuste de modelos predictivos complejos. Las extensas bibliotecas de Python, como NumPy, SciPy y pandas, proporcionan recursos poderosos para el análisis de datos, la visualización y el Machine Learning, por lo que se convierte en una herramienta invaluable para llevar a cabo los modelos predictivos (Kovac et al., 2024). Entre ellos se destacan el modelo de Regresión Lineal, esencial para examinar y modelar relaciones lineales entre variables; ARIMAX, especializado en el análisis de series temporales; por último, Gradient Boosting Regressor, un algoritmo de aprendizaje supervisado que construye árboles de decisión secuenciales.

A pesar de las dificultades técnicas y económicas para obtener suficientes datos experimentales (Ngige et al., 2022), la incorporación de tecnologías de inteligencia artificial, como el aprendizaje automático, podría ayudar a las empresas a no solo optimizar la eficiencia operativa y disminuir costos, sino también prever fallos, asegurar la seguridad en las plantas y mejorar la calidad de los productos. En base a esto, el presente estudio tuvo como objetivo el

modelado dinámico de la concentración de hidrógeno en un reactor de polimerización empleando técnicas de Machine Learning, mediante el procesamiento de datos históricos, y su posterior empleo para el entrenamiento de los modelos, generación de predicciones y evaluación de las métricas relevantes obtenidas con respecto a los valores reportados por la literatura.

1. Fundamentos teóricos

1.1. Bases teóricas

Machine Learning

El aprendizaje automático es una rama particular de la inteligencia artificial que enseña a una máquina cómo aprender, mientras que la Inteligencia Artificial (IA) es la ciencia general que busca emular las habilidades humanas. Un método de IA, llamado aprendizaje automático, enseña a las computadoras a aprender de sus experiencias pasadas. Los algoritmos de aprendizaje automático no dependen de una ecuación predeterminada como modelo, sino que "aprenden" información directamente de los datos utilizando técnicas computacionales. A medida que aumenta la cantidad de ejemplos de aprendizaje, los algoritmos mejoran adaptativamente en lo que hacen. Este documento proporciona una visión general del campo, así como una variedad de enfoques de ML, incluyendo el aprendizaje supervisado, no supervisado y por refuerzo, y varios lenguajes utilizados para el aprendizaje automático (Shaveta, 2023).

Modelo de regresión lineal (Linear regression)

De acuerdo a Qu (2024), la regresión lineal es un método estadístico utilizado para establecer una relación lineal entre una variable independiente X y una variable dependiente Y . El objetivo es encontrar una función lineal óptima, es decir, determinar un conjunto de coeficientes (pesos) de tal manera que la función pueda predecir el valor de la variable dependiente con la mayor precisión posible. El objetivo principal de los algoritmos de regresión lineal es encontrar la mejor estimación de parámetros, de manera que la diferencia entre el valor predicho por el modelo y los datos reales sea mínima. Cuando existen múltiples factores que afectan a la variable dependiente, se necesita un modelo de regresión lineal múltiple.

Modelo ARIMA con variables exógenas (ARIMAX)

Hyndman y Athanasopoulos (2021) definen los modelos ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) como una metodología estadística para pronosticar series temporales univariantes, combinando tres componentes esenciales: autorregresivo (AR), integrado (I) y media móvil (MA). De acuerdo a Alharbi y Csala (2022), el modelo ARIMAX es una evolución del ARIMA que emplea series temporales multivariadas para predecir la variable dependiente. A diferencia del ARIMA tradicional, incorpora múltiples series temporales como variables exógenas. Su diseño específico para series temporales distingue al ARIMAX de los modelos de aprendizaje supervisado, ya que considera la secuencia de las entradas como un factor crucial.

Modelo Gradient Boosting Regressor (GBR)

El Modelo Gradient Boosting Regressor emplea un enfoque de aprendizaje en conjunto, donde se construyen modelos de predicción robustos mediante la combinación de múltiples árboles de regresión individuales, conocidos como aprendices débiles. Este tipo de algoritmo disminuye la tasa de error de estos aprendices débiles (regresores o clasificadores). Los aprendices débiles son aquellos que presentan un alto sesgo hacia los datos de entrenamiento, con baja varianza y regularización, y cuyas predicciones solo muestran una ligera mejora en comparación con conjeturas aleatorias. En general, los algoritmos de impulso (boosting) constan de tres elementos clave: un modelo aditivo, aprendices débiles y una función de pérdida. El algoritmo es capaz de modelar relaciones no lineales (Singh et al., 2021).

Coefficiente de Determinación (R^2)

Según Chicco, Warrens y Jurman (2021), el coeficiente de determinación (R^2) se puede interpretar como la proporción de la varianza en la variable dependiente que es explicada o predecible por las variables independientes, es decir, indica qué porcentaje de la variación en la variable que se quiere predecir (la dependiente) puede explicarse por las variables que se utilizan para la predicción (las independientes). Es una métrica clave para evaluar la capacidad de un modelo de regresión para explicar la variabilidad de la variable objetivo. Un R^2 de 1 señala un ajuste perfecto, donde el modelo explica toda la varianza, mientras que un R^2 de 0 implica que el modelo no ofrece mejor predicción que la media de los datos.

1.2. Revisión de Antecedentes

Calofir et al. (2024) propuso una metodología innovadora para evaluar el daño sísmico en estructuras de marcos resistentes a momentos mediante el uso de algoritmos de aprendizaje automático que fueron entrenados y probados con un extenso conjunto de datos, generados a través de simulaciones numéricas, para replicar el índice de daño estructural de Park-Ang. Se ajustó el porcentaje de entrenamiento y prueba para optimizar la generalización, evitando tanto el subajuste como el sobreajuste, y utilizando la validación cruzada para asegurar la robustez del modelo. De esta investigación se verificó la metodología seguida, así como el porcentaje de la data empleada para el entrenamiento y las técnicas para evitar el sobreajuste y lograr buena generalización en la predicción.

Por otro lado, en el estudio realizado por Mansi et al. (2023) se propone un modelo de aprendizaje automático supervisado, basado en regresión lineal y redes neuronales artificiales (ANNs), para evaluar la eficiencia de la recuperación mejorada de gas (EGR) mediante inyección de CO₂ en yacimientos de lutitas, un proceso complejo controlado por múltiples parámetros. Utilizando un amplio conjunto de datos de simulaciones y experimentos, el modelo buscó predecir el incremento de CH₄ recuperado. De este trabajo, se logró verificar tanto la metodología como el empleo del coeficiente de correlación para la evaluación del desempeño de los modelos. Así mismo, Gou et al. (2024) entrenó cuatro modelos de aprendizaje automático (regresión lineal múltiple, árboles de decisión, regresores Adaboost y bagging) para predecir la producción y composición de biocarbón a partir de residuos orgánicos, superando las limitaciones de precisión y coste computacional de los modelos existentes. Entrenados con datos de pruebas de pirólisis, los modelos logran un R² de hasta 0.96, demostrando una precisión predictiva significativamente superior. Destaca como aporte de investigación las técnicas de preprocesamiento de datos empleados, además de la metodología desarrollada y el empleo del coeficiente de determinación para la evaluación de los modelos.

2. Metodología

La presente investigación se caracteriza por ser de tipo correlacional, al determinar la relación o asociación entre las variables de proceso, y predictiva, por predecir valores futuros de la concentración de hidrógeno basándose en datos históricos. Su diseño es no experimental, cuantitativo y retrospectivo. La población estudiada es clasificada como accesible, referida a los

datos históricos de las variables de proceso seleccionadas. La muestra fue seleccionada en un rango de tiempo de 3 días, con intervalos de 5 minutos. Por otro lado, como técnica de recolección de datos se empleó la observación documental, y como instrumentos se utilizaron la Hoja de Excel para la recolección de datos registrados en el programa Uniformance Process Studio, y el lenguaje de programación Python, mediante el editor de código Visual Studio Code, para el procesamiento de los mismos. Esta metodología permitió verificar el rendimiento de los modelos predictivos, garantizando la precisión y relevancia de los resultados obtenidos.

3. Resultados

3.1. Preprocesamiento de datos

Se aplicaron las técnicas de creación de rezagos, limpieza de datos faltantes y detección de valores atípicos, obteniendo finalmente el marco de datos preprocesado con valores representativos del proceso. En la Tabla 1 se observan las variables seleccionadas.

Tabla 1. Variables seleccionadas para el marco de datos preprocesado

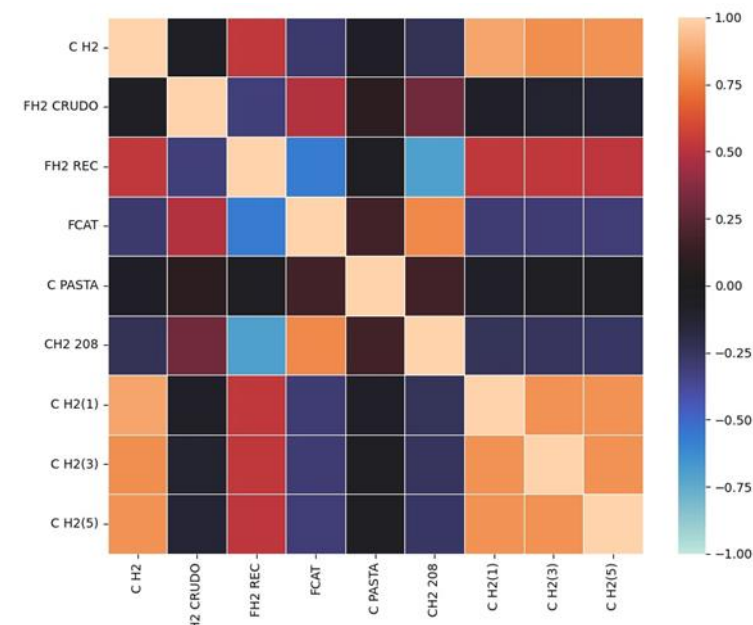
Variable	Descripción	Unidad
CH2	Concentración de hidrógeno en el reactor de polimerización	Fracción molar
FH2 CRUDO	Flujo de hidrógeno crudo hacia el reactor	kg/h
FCAT	Flujo de catalizador hacia el reactor	kg/h
FH2 REC	Flujo de hidrógeno recirculado hacia el reactor	kg/h
C PASTA	Concentración de la pasta en el reactor	Fracción molar
CH2 208	Concentración de hidrógeno en el tambor de reciclo	Fracción molar
C H2(i)	Rezago de la concentración de hidrógeno en el reactor para la posición i	Fracción molar

Fuente: elaborado por los autores, datos de la investigación

3.2. Análisis de correlación de variables

Se aplicaron técnicas para la verificación de la correlación entre las variables de proceso y los rezagos correspondientes a la concentración de hidrógeno. De esa manera, se generó la matriz de correlación visualizándose en forma de Heatmap. tal como se observa en la Figura 1, de esta forma es posible apreciar visualmente la correlación en una matriz de colores relacionados a escala, donde la correlación positiva perfecta fue representada por el valor 1, la correlación negativa por el -1, y la ausencia de correlación por el 0 (Khodabakhshi y Bijani, 2024).

Figura 1. Mapa de calor (Heatmat) de las variables de proceso



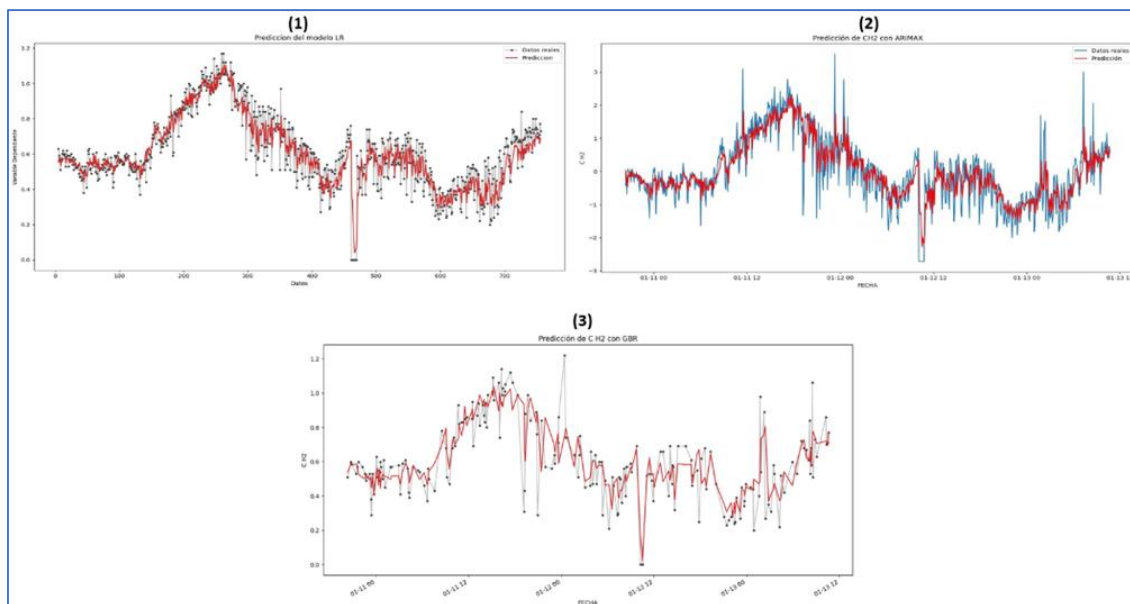
Fuente: elaborado por los autores, datos de la investigación

3.3. Selección del modelo de predicción

En la Figura 2, se puede apreciar la predicción de la concentración de hidrógeno comparada con los datos reales en cada uno de los modelos de predicción utilizados. Se destacan cuatro modelos en el análisis: Linear Regression, ARIMAX y Gradient Boosting Regressor (GBR). La visualización demuestra cómo cada modelo aborda la predicción de la concentración de hidrógeno, permitiendo identificar las diferencias y similitudes en sus aproximaciones. Es evidente

que el modelo de Linear Regression sigue más de cerca la tendencia de los datos reales, mostrando un ajuste más preciso y una menor desviación en comparación con los otros modelos.

Figura 2. Predicción de la concentración de hidrógeno en el reactor de polimerización basado en el modelo: (1) Linear Regression, (2) ARIMAX, (3) GBR



Fuente: elaborado por los autores, datos de la investigación

Se seleccionó el modelo predictivo de Linear Regression por su correlación de 0.7950, con respecto a las variables de proceso seleccionadas para el marco de datos preprocesado. Esto puede evidenciarse en la Tabla 2, donde se visualiza el coeficiente de determinación obtenido para cada modelo.

Tabla 2. Coeficiente de determinación obtenido para cada modelo predictivo

Modelo predictivo	Coeficiente de determinación
Linear Regression	0.7950
ARIMAX	0.6722
Gradient Boosting Regressor	0.6395

Fuente: elaborado por los autores, datos de la investigación

3.4. Ajuste del modelo

A partir del modelo seleccionado, se aplicaron nuevas técnicas con el fin de aumentar la precisión de la predicción. Se realizó entonces el agrupamiento de variables en intervalos de 2 y 3 mediciones temporales. Posterior a ello, se generaron las curvas de predicción y residuales; se visualizaron así mismo los coeficientes e intercepto de la ecuación de regresión. de manera que se lograra incrementar la correlación, verificar la magnitud de los residuales, y corroborar la relación entre variables. En cuanto al agrupamiento de observaciones, se determinó la correlación a diferentes porcentajes de datos seleccionados para el entrenamiento y, de acuerdo al agrupamiento entre cada dos y tres mediciones temporales, tal como se muestra en la Tabla 3. En base a estos resultados, se emplea un porcentaje de entrenamiento de 80% y un agrupamiento de dos mediciones para evitar la reducción excesiva en la cantidad de datos y capacidad de generalización del modelo.

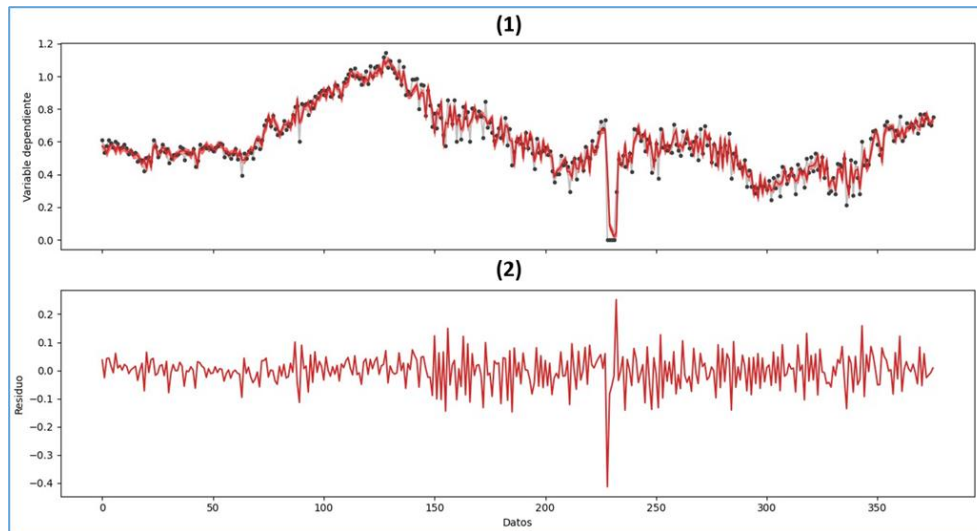
Tabla 3. Coeficientes de determinación del modelo de Linear Regression en agrupamientos entre cada dos y tres mediciones temporales

Entrenamiento (%)	r2 (Original)	r2 (2 Mediciones)	r2 (3 Mediciones)
10	0.7591	0.8940	0.9204
20	0.7739	0.8793	0.9237
30	0.7828	0.9077	0.9458
40	0.7824	0.9077	0.9535
50	0.7908	0.9091	0.9536
60	0.7925	0.9078	0.9536
70	0.7871	0.9084	0.9538
80	0.7928	0.9102	0.9542
90	0.7933	0.9106	0.9544

Fuente: elaborado por los autores, datos de la investigación

En la Figura 3 se observa el gráfico de la predicción de los datos reales por el modelo de Linear Regression, junto al respectivo grafico de residuales en la parte inferior, a partir del cual se obtuvo una correlación en el rango de 0.88 – 0.92 para los distintos porcentajes de entrenamiento en conjunto con los cambios realizados.

Figura 3. Predicción de la concentración de hidrógeno en el reactor de polimerización basado en el modelo Linear Regression (1) junto al grafico de residuales (2)



Fuente: elaborado por los autores, datos de la investigación

Por otro lado, se determinaron los coeficientes del modelo de regresión lineal multivariable ajustado en la Ec. 1, junto al término de intersección referido a la ordenada en el origen.

$$Y = 0.0616 + 1.0319 \cdot 10^{-2}X_1 + 1.3326 \cdot 10^{-4}X_2 - 1.7982 \cdot 10^{-3}X_3 - 3.9423 \cdot 10^{-5}X_4 \quad \text{Ec. 1}$$

$$+ 3.1326 \cdot 10^{-2}X_5 + 8.0524 \cdot 10^{-1}X_6 + 6.4393 \cdot 10^{-2}X_7 + 8.1450 \cdot 10^{-2}X_8$$

3.5. Análisis de sensibilidad

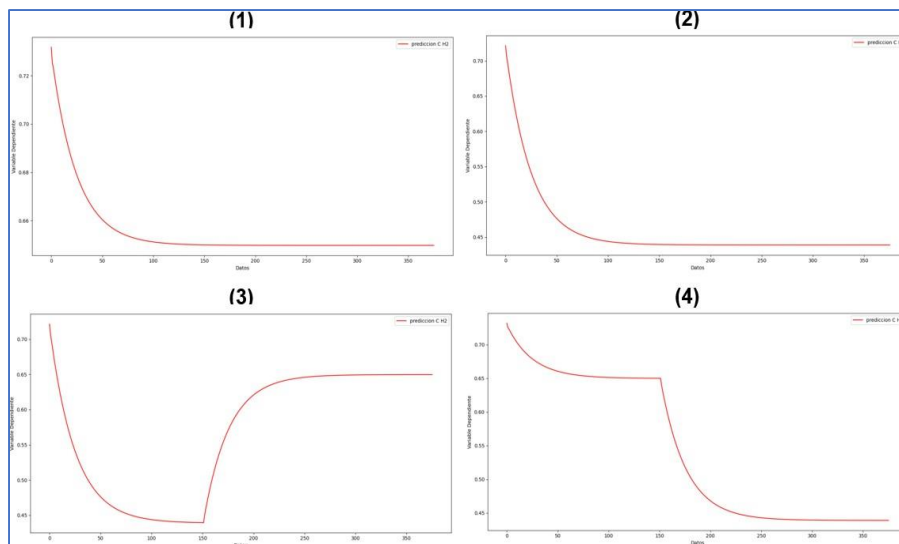
En la Tabla 4, se observa el valor inicial y final, además del valor de alcanzado antes y después del cambio en el flujo de hidrógeno crudo con respecto a la predicción de la concentración de hidrógeno, lo cual se registró a partir de los gráficos de la Figura 5. Por otro lado, los valores de referencia basados en la data histórica extraída pueden visualizarse en la Figura 6.

Tabla 4. Flujo de hidrógeno crudo inicial y final ajustado, junto a la predicción de la concentración de hidrógeno antes y después del punto de cambio

Prueba	FH2 Crudo Inicial (kg/h)	FH2 Crudo Final (kg/h)	CH2 Inicial (fracción molar)	CH2 Final (fracción molar)
1	3	3	0.65	0.65
2	2	2	0.44	0.44
3	2	3	0.44	0.65
4	3	2	0.65	0.44

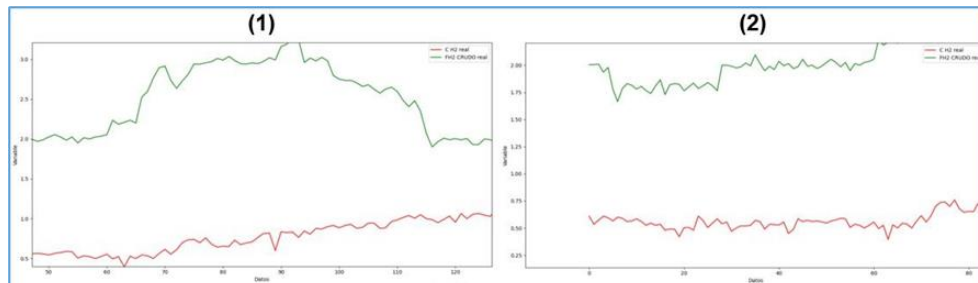
Fuente: elaborado por los autores, datos de la investigación

Figura 5. Análisis de sensibilidad para la prueba: (1) 3 kg/h, (2) 2 kg/h, (3) Incremento, (4) Disminución



Fuente: elaborado por los autores, datos de la investigación

Figura 6. Concentración de hidrógeno en el reactor de polimerización frente al flujo de hidrógeno crudo, datos históricos: (1) 3 kg/h, (2) 2 kg/h



Fuente: elaborado por los autores, datos de la investigación

4. Análisis y discusión de los resultados

Se llevaron a cabo técnicas de preprocesamiento en los datos industriales extraídos, fundamentales debido a la naturaleza incompleta, inconsistente o inesperada de estos registros, como evidenció el estudio de Gou et al. (2024), que reportó numerosos valores faltantes en los datos recuperados, resaltando la importancia crítica de este paso para garantizar la limpieza, estructuración adecuada y optimización del rendimiento de modelos de aprendizaje automático. Inicialmente, se abordó la limpieza de datos faltantes y la detección de valores atípicos mediante el método estadístico de puntuación Z, sustituyendo dichos valores por la media calculada en una ventana móvil de referencia para preservar la integridad temporal de los datos. Posteriormente, se generaron variables rezagadas, considerando que los cambios en una variable de perturbación pueden influir en la concentración de hidrógeno del reactor de polimerización con cierto retraso, inherente a la dinámica del proceso.

Por otro lado, el análisis de correlación es uno de los enfoques más utilizados para indicar la relación entre dos o más variables cuantitativas en el modelado predictivo, siendo esenciales para comprender la dependencia entre las variables de entrada/salida, para la selección de los predictores, y para evitar el sobreajuste del modelo (Mansi et al., 2023). De esa manera, se observa en el Heatmap realizado (Figura 1) que existe una fuerte relación positiva de la variable de entrada en relación a su variable de rezago de un paso temporal, seguida del resto de retrasos. Puede destacarse una fuerte relación negativa de la concentración de hidrógeno con respecto al flujo de catalizador hacia el reactor de polimerización, siendo coherente con la relación teórica.

Para la obtención de los tres modelos de predicción para su evaluación, se decidió trabajar con un porcentaje de entrenamiento del 80 % de la data suministrada, a modo de seleccionar el modelo con el mejor comportamiento para el análisis predictivo, tal como fue ejecutado en el estudio de Calofir (2024). Los resultados obtenidos pueden compararse con el estudio realizado por Mansi et al. (2023) sobre la predicción de la recuperación mejorada de CH₄ por inyección de CO₂, donde se registraron correlaciones de 0.68 para el modelo de regresión lineal, y de 0.778 para el segundo modelo evaluado, referido al de redes neuronales artificiales, mientras que en la presente investigación se logró un mayor coeficiente de determinación para el modelo Linear Regression, (0.7950) siendo seleccionado como el más adecuado para la predicción de la concentración de hidrógeno (Figura 2) en comparación con los modelos de ARIMAX (0.6722) y

Gradient Boosting Regressor (0.6395). Esta precisión se evidencia en la menor desviación de las predicciones respecto a los valores reales.

Posteriormente se logró verificar que el agrupamiento de los datos entre cada dos y tres mediciones temporales mejoró la correlación en un 14.55 % y 20.33 % respectivamente en relación al marco de datos original, tomando como referencia el porcentaje de entrenamiento del 80 %. Sin embargo, se decidió trabajar con un agrupamiento de dos mediciones, ya que no es conveniente la supresión masiva de datos para ajustar y entrenar el modelo predictivo, tomando en consideración que la mejora con respecto al agrupamiento entre tres mediciones no es significativa.

En el gráfico de residuales (Figura 3) se visualizó una variación entre la predicción y el comportamiento real en un rango aproximado de -0.2 y 0.2, con un pico máximo en -0.4, punto en el cual coincide con un cambio abrupto en el comportamiento de la data real, producto de un corte repentino del flujo de hidrógeno alimentado. Sin embargo, se aprecia de igual forma que el modelo predictivo reproduce con efectividad el comportamiento esperado ante la perturbación mencionada. También se observa su dificultad de predicción sobre la disminución de la concentración de hidrógeno, ya que en el rango de observaciones del marco de datos agrupado entre 140 y 210, donde se reduce la concentración tanto en la data real como en la línea de predicción, se visualizan mayores valores de error, al igual que en el rango de 330 a 340.

Por otro lado, en la ecuación del modelo de regresión lineal multivariable (Ec. 1), se aprecia una relación positiva de la concentración de hidrógeno en el reactor (Y) con respecto a las variables independientes de flujo de hidrógeno crudo (X1), flujo de hidrógeno recirculado (X2), y la concentración de hidrógeno de reciclo (X5), lo que implica que, al aumentar estas variables de perturbación, debería incrementarse la variable dependiente. De igual forma, el flujo de catalizador (X3) y la concentración de pasta en el reactor (X4), registraron un coeficiente negativo, indicando una relación inversa con respecto a la variable dependiente estudiada. En cuanto a las variables de rezago de la concentración de hidrógeno, se obtuvo que en el retraso número 1, 3 y 5, la relación fue positiva, correspondiente a las variables X6, X7 y X8 respectivamente. Estos resultados fueron los esperados según la relación teórica, confirmando la validez del modelo propuesto y su capacidad para capturar el comportamiento de la data histórica.

En cuanto al análisis de sensibilidad efectuado, se aprecia que para un valor constante de flujo de hidrógeno crudo hacia el reactor de 3 kg/h, se obtuvo una predicción de la concentración

de hidrógeno final de 0.65, tal como se observa en la sección (1) de la Figura 5. Por otro lado, para un valor constante de flujo de hidrógeno crudo de 2 kg/h, se obtuvo una predicción de la concentración de hidrógeno final de 0.44, tal como se observa en la sección (2) de la Figura 5. Esto concuerda con los valores registrados de la data histórica, ya que para un valor de flujo de hidrógeno de 3 kg/h, se visualizó en la sección (1) de la Figura 6 una concentración en el rango de 0.6 a 0.8, mientras que para un valor de 2 kg/h, se obtuvo una concentración en el rango de 0.4 a 0.6, lo cual logra apreciarse en la sección (2) de la Figura 6.

Para la tercera prueba realizada, donde se ejecutó un cambio del flujo de hidrógeno fresco desde 2 hasta 3 kg/h, se observó en la sección (3) de la Figura 5 una estabilización de la concentración de hidrógeno en un valor de 0.44, y luego de pasar el punto de cambio (observado en el eje de las abscisas), se incrementó hasta estabilizarse en el valor de 0.65, lo cual concuerda con los valores reportados anteriormente, apreciando una relación positiva entre ambas variables. Para la última prueba, donde se ejecutó una reducción del flujo de hidrógeno fresco en el mismo punto desde 3 hasta 2 kg/h, se observó en la sección (4) de la Figura 5 una estabilización de la concentración de hidrógeno a un valor de 0.65, y luego se redujo hasta estabilizarse a un valor de 0.44, lo cual concuerda con los valores reportados anteriormente, por lo que se aprecia de igual manera una relación positiva entre ambas variables.

Conclusiones

Se obtuvo una estructura de datos con valores representativos del proceso, por medio de la aplicación de métodos para el preprocesamiento de datos de las variables, incluyendo la creación de rezagos, la limpieza de datos faltantes y la detección de valores atípicos.

Se identificaron las variables con mayor sensibilidad y aporte de información al modelo, a través de la implementación de técnicas estadísticas de correlación entre variables y visualización de la matriz de correlación en forma de Heatmap.

Se seleccionó el modelo de Linear Regression para el análisis predictivo dado su mayor coeficiente de determinación luego del entrenamiento (0.7950), frente a lo reportado para ARIMAX (0.6722) y GBR (0.6395).

Se obtuvo una mejora del 14.55 % para la correlación del modelo predictivo seleccionado, mediante la agrupación de observaciones entre cada dos mediciones temporales, con

coeficientes de determinación en el rango de 0.88 – 0.92 al variar el porcentaje de datos empleado para el entrenamiento.

Durante el análisis de sensibilidad, se observó que la concentración de hidrógeno en el reactor presentó valores de 0.65 y 0.44 al variar el flujo de hidrógeno crudo a 3 kg/h y 2 kg/h, respectivamente. Estos resultados evidenciaron una relación directamente proporcional entre el flujo de hidrógeno y su concentración en el reactor, tanto al incrementar como al reducir el flujo.

Referencias

- Alharbi, F. y Csala, D. (2022). A Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Factors (SARIMAX) Forecasting Model-Based Time Series Approach. *Inventions*, 7(4), 94. <https://doi.org/10.3390/inventions7040094>
- Calofir, V., Munteanu, R., Simoiu, M. y Lemnaru, K. (2024). Innovative approach to estimate structural damage using linear regression and K-nearest neighbors machine learning algorithms. *Results in Engineering*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102250>
- Chicco, D., Warrens, M. y Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 7, 623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
- Dubravova, H., Cap, J., Holubova, K. y Hribnak, L. (2024). Artificial Intelligence as an Innovative Element of Support in Policing. *Procedia Computer Science*, 237, 237-244. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.05.101>
- Forero-Corba, W. y Negre, F. (2024). Técnicas y aplicaciones del Machine Learning e Inteligencia Artificial en educación: una revisión sistemática. *Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, 27(1), 209-253. <https://doi.org/10.5944/ried.27.1.37491>
- Gou, J., Sajid, G., Sabri, M., El-Meligy, M., El Hindi, K. y Othman, N. (2024). Optimizing biochar yield and composition prediction with ensemble machine learning models for sustainable production. *Ain Shams Engineering Journal*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.103209>
- Hyndman, R. y Athanasopoulos, G. (2021). *Forecasting: principles and practice*. (3.^a ed.). OTexts. <https://otexts.com/fpp3/>
- Khodabakhshi, M. y Bijani, M. (2024). Predicting scale deposition in oil reservoirs using machine learning optimization algorithms. *Results in Engineering*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102263>
- Kovac, N., Ratkovic, K., Farahani, H. y Watson P. (2024). A practical applications guide to machine learning regression models in psychology with Python. *Methods in Psychology*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.metip.2024.100156>
- Mansi, M., Almobarak, M., Ekundayo, J., Lagat C. y Xie, Q. (2023). Application of supervised machine learning to predict the enhanced gas recovery by CO₂ injection in shale gas reservoirs. *Petroleum*, 10, 124-134. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2023.02.003>

- Ngige, G., Ovuoraye, P., Igwegbec, C., Fetahi, E., Okeke, J., Yakubud, A. y Onyechi, P. (2022). RSM optimization and yield prediction for biodiesel produced from alkali-catalytic transesterification of pawpaw seed extract: Thermodynamics, kinetics, and Multiple Linear Regression analysis. *Digital Chemical Engineering*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2022.100066>
- Qu, K. (2024). Research on linear regression algorithm. *MATEC Web of Conferences*, 395. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439501046>
- Shaveta, N. (2023). A review on machine learning. *International Journal of Science and Research Archive*, 9(1), 281–285. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2023.9.1.0410>
- Singh, U., Rizwan, M., Alaraj, M. y Alsaidan, I. (2021). A Machine Learning-Based Gradient Boosting Regression Approach for Wind Power Production Forecasting: A Step towards Smart Grid Environments. *Energies*, 14(16), 5196. <https://doi.org/10.3390/en14165196>

Declaración de conflicto de interés y originalidad

Conforme a lo estipulado en el *Código de ética y buenas prácticas* publicado en **PetroRenova Indexed, Revista Científica de la Energía**, los autores **Sabino Montero, Karla Valentina y Noguera Hernández, José Ricardo**, declaran al Comité Editorial que no tienen situaciones que representen conflicto de interés real, potencial o evidente, de carácter académico, financiero, intelectual o con derechos de propiedad intelectual relacionados con el contenido del artículo: **Predicción de la Concentración de Hidrógeno en un Reactor de Polimerización basado en Machine Learning**, en relación con su publicación. De igual manera, declaran que el trabajo es original, no ha sido publicado parcial ni totalmente en otro medio de difusión, no se utilizaron ideas, formulaciones, citas o ilustraciones diversas, extraídas de distintas fuentes, sin mencionar de forma clara y estricta su origen y sin ser referenciadas debidamente en la bibliografía correspondiente. Consienten que el Comité Editorial aplique cualquier sistema de detección de plagio para verificar su originalidad.

Para citar este artículo:

Sabino, K. y Noguera, J. (2025). Predicción de la Concentración de Hidrógeno en un Reactor de Polimerización basado en Machine Learning. *PetroRenova, Revista Científica de la Energía*. Vol. 1, núm. 1, abril-junio. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15643200>

Instrucciones para los autores

Consideraciones generales sobre la presentación y envío de los manuscritos

Los investigadores y público en general interesados en publicar sus trabajos en *PetroRenova Indexed*, pueden acceder al sitio web de la revista (https://indexed.petrorenova.com/index.php/petrorenova_indexed/index) registrarse, consultar las políticas y normativas, así como los formatos respectivos. Por medio de la opción **enviar un artículo**, se procede a llenar los campos requeridos y cargar el manuscrito. También podrán enviarlo a través del correo electrónico puesto a disposición (indexed.petrorenova@gmail.com). De utilizar este medio, deberá enviar el manuscrito en el formato destinado al tipo de publicación.

PetroRenova Indexed proporciona acceso abierto a sus publicaciones, bajo licencia Creative Commons (BY-NC-SA) Attribution 4.0 Internacional. En este sentido, todas las publicaciones que están disponibles en el portal, pueden descargarse en formato pdf gratuitamente.

Con el manuscrito de la propuesta del trabajo, se enviará al correo mencionado, una comunicación escrita, firmada por el autor o los autores, dirigida al Consejo Editorial de la revista en la que se autoriza a someter el trabajo a evaluación y publicación. En dicha comunicación se debe señalar que el trabajo propuesto es original, inédito y no está sometido simultáneamente a proceso de evaluación y arbitraje en otra revista.

Desde el momento que el trabajo es aceptado y publicado, el autor o los autores, acepta(n) la cesión de derechos patrimoniales de autor a *PetroRenova Indexed*, a través de un formato que les hará llegar el equipo editorial. Este se reserva el derecho de aplicar cambios de estilo y forma al manuscrito para garantizar la calidad científica del mismo. *PetroRenova Indexed* puede publicar el artículo en formatos físicos o electrónicos, incluido Internet, bases de datos y otros sistemas de información vinculados a la revista. Los autores podrán usar la versión final de su artículo en cualquier repositorio, sitio web o impresos.

Es de importancia aclarar que los datos del autor o los autores deben ser enviados en un documento adjunto, tanto en español como en inglés, que incluya apellidos, nombres, dirección, teléfono, correo electrónico, Orcid, títulos académicos, afiliación institucional con mención del país, cargos actuales, sociedades a las que pertenece, estudios realizados o en curso y publicaciones recientes.

Presentación de los trabajos

Los trabajos deben presentar un resumen de 150 palabras como máximo y cuatro (4) palabras clave. Tanto el resumen como las palabras clave estarán en español e inglés. Igualmente, el título y el subtítulo del trabajo serán presentados también en los idiomas anteriormente mencionados. La extensión será entre quince (15) y treinta y cinco (35) cuartillas. Todos los trabajos serán presentados en hoja tipo carta, a una sola cara, con numeración continua y con márgenes de dos (2,5) centímetros en todos los lados. Se recomienda utilizar el formato para presentación de trabajos disponible en el portal de la revista.

El texto se presentará con interlineado de 1,5, en fuente Arial, tamaño 11, con espaciado posterior entre párrafos de 6 pts. Para las notas a pie de página y los contenidos de las tablas, el tamaño será en fuente Arial tamaño 9, con interlineado sencillo.

Evaluación de los trabajos

Todos los trabajos serán evaluados bajo la modalidad doble ciego por parte de un Comité de Árbitros, conformado por tres (3) de los miembros del Comité Científico y dos (2) especialistas de reconocido prestigio, seleccionados por el Comité Editorial de la revista, quienes no conocerán sus identidades. Los criterios de evaluación son los siguientes:

a. Criterios formales o de presentación: 1) originalidad, pertinencia y adecuada extensión del título, 2) claridad y coherencia del discurso, 3) adecuada elaboración del resumen, 4) organización interna del texto y 5) todos los demás criterios establecidos en la presente normativa.

b. Criterios de contenido: 1) dominio de conocimiento evidenciado, 2) rigurosidad científica, 3) fundamentación teórica y metodológica, 4) actualidad y relevancia de las fuentes consultadas y 5) aportes al conocimiento existente.

Una vez recibidos, los trabajos siguen el siguiente proceso, en un tiempo promedio de 60 días: a) inicialmente, se acusa recibo del manuscrito vía correo electrónico; b) seguidamente, el Consejo Editorial realiza una **revisión preliminar** (tiempo estimado 10 días) para determinar si cumple con las Normas para la presentación de trabajos; c) si las cumple, pasa al **arbitraje** (revisión de manuscritos, tiempo estimado 20 días), proceso en el cual especialistas calificados evalúan los trabajos atendiendo criterios de pertinencia, originalidad, aportes y rigurosidad científica y académica. El Comité de árbitros

Instrucciones para los autores

Instructions for authors

emitirán un veredicto sobre el trabajo presentado, el cual consistirá en: c-1) **Publicable**; c-2) **Publicable con ligeras modificaciones**, que implican aquellas de forma y estilo, en miras de adaptarse a los criterios formales o de presentación de la revista; c-3) **Publicable con modificaciones sustanciales**, que implican aquellas de fondo y construcción del manuscrito, en miras de adaptarse a los criterios de contenido de la revista; c-4) **No publicable**; d) si el trabajo no cumple con los criterios mínimos presente en estas normas; el Consejo Editorial propondrá que no sea enviado al proceso de arbitraje; e) en cualquier caso, la directora de la revista notificará al autor o autores, por escrito, la decisión. En el caso que el veredicto de los árbitros difiera uno de otro (publicable/no publicable), el artículo será sometido a un nuevo arbitraje, hasta obtener una decisión unánime.

En caso de decisión **publicable con modificaciones ligeras o sustanciales**, el o los autores tendrán un máximo de diez (10) días para el envío de las modificaciones al Comité Editorial al siguiente correo electrónico: indexed.petrorenova@gmail.com En caso de no enviar las correcciones en el lapso establecido, se asume **desinterés por parte del o los autores de no publicar su trabajo**. Si el o los autores deciden no publicar su trabajo, deberán presentar una comunicación en la cual dejen claro la no publicación del material enviado en la revista.

Los evaluadores no utilizan IA generativa o tecnologías asistidas por IA para realizar la evaluación o el proceso de toma de decisiones de un manuscrito, ya que el pensamiento crítico y la evaluación original, necesarios para este trabajo, están fuera del alcance de esa tecnología y se pudiesen generar conclusiones incorrectas, incompletas o sesgadas sobre el manuscrito.

La responsabilidad del proceso de arbitraje y la decisión final de publicación de los artículos recae en el Comité Editorial, en la figura de su directora.

Proceso editorial

El Comité Editorial de *PetroRenova Indexed* se reserva la última palabra sobre la publicación de los artículos y el número en el cual se publicarán. El orden de la publicación y la orientación temática de cada número lo determinará el Comité Editorial, sin importar el orden en que los manuscritos hayan sido recibidos y arbitrados. Con base en ello, se les informará a los autores el número y las fechas aproximadas de su publicación. Durante este proceso, el Comité Editorial se reserva el derecho de hacer los ajustes y cambios que aseguren la calidad de la publicación.

El autor deberá estar presto a las comunicaciones de la revista por medio de correo electrónico. También deberá proporcionar información de la investigación que soporta el artículo, certificar que el escrito es de su autoría y que en este se respetan los derechos de propiedad intelectual de terceros, mediante el envío de las comunicaciones mencionadas.

Cuerpo del artículo

Idioma: Los artículos deben ser presentados y redactados en idioma nativo; si es español, el artículo completo se redacta en idioma español y, tanto el resumen como las palabras clave se traducen al inglés. Si es inglés, el artículo completo se redacta en idioma inglés y, tanto el resumen como las palabras clave se traducen al español. Los autores que deseen ampliar el ámbito de lectores internacionales, pueden enviar sus trabajos en español, inglés y en su idioma nativo diferente a los dos mencionados, esto garantiza un mayor número de lectores.

Título: Debe ser corto, explicativo y contener la esencia del trabajo. Este título debe proporcionarse tanto en el idioma español como inglés. Se establecen los siguientes criterios para la redacción del título: a) claridad, b) brevedad (se sugiere entre 10 y 15 palabras), c) especificidad y d) originalidad.

Autor(es): Indicar los nombres y apellidos completos, títulos profesionales, el nombre de la institución donde se realizó el trabajo o de la institución a la cual pertenece el autor, ORCID actualizado con información como investigador, ciudad y país. El número máximo de autores es de cuatro (4).

Resumen: No mayor de ciento cincuenta (150) palabras, en español y en inglés, en un solo párrafo con interlineado sencillo y sin sangría. En caso que el trabajo se presente en otro idioma, el resumen debe redactarse en ese mismo idioma, en español e inglés. En la redacción del resumen se reseña el objetivo del trabajo, los métodos utilizados, resultados y conclusiones. Se establecen los siguientes criterios para la redacción del resumen: a) preciso, b) completo, c) conciso y d) específico.

Palabras clave: Deberán incluirse cuatro (4) palabras clave en español y en inglés. Estas palabras descriptivas facilitan la inclusión del artículo en las bases de datos internacionales. Se sugiere hacer uso del thesaurus de la UNESCO disponible en: <https://vocabularies.unesco.org/browser/thesaurus/es/>

Apartados y sub-apartados: Los trabajos, en forma general, deberán dividirse en introducción, fundamentos teóricos, metodología, resultados: análisis y discusión, conclusión o consideraciones finales y referencias bibliográficas. En el desarrollo, los sub-apartados deberán tener numeración arábiga, siendo de libre titulación y división por parte del autor, procurando el mantenimiento de coherencia interna tanto de discurso como de temática.

Instrucciones para los autores

Instructions for authors

Normas de citas y referencias

Citas: El citado se realizará tomando en cuenta las **normas de la American Psychological Association (APA) en su 7ma. edición actualizada** y aplicando las pautas establecidas en este apartado.

Citas textuales: en el texto se utiliza la modalidad autor-fecha y número de página, se reproduce exactamente las palabras del autor. Si la cita es hasta 40 palabras, se incorpora en el texto entre comillas dobles, sin cursiva. *Ejemplos:*

1. Apellido autor (año) afirma que "texto de la cita" (página).
Según los resultados, Almarza (2020) afirma que "texto de la cita" (p. 5).
2. "texto de la cita" (Apellido autor, año, página).
"las clases sociales se distinguen..." (Almarza, 2020, p. 3).

Si la cita tiene más de 40 palabras, se escribe aparte del texto, en bloque, con sangría en 1 cm en márgenes izquierdo y derecho, sin comillas, sin cursiva y con interlineado sencillo. Al final de la cita se coloca el punto, seguido del Apellido del autor, año y número de página, entre paréntesis. *Ejemplos:*

En consecuencia,

Texto de la cita. (González, 2012, p. 4)

En el caso de la cita textual narrativa,

Por su parte, Alfonso (2012) afirma que

Texto de la cita. (p. 6)

Citas tipo paráfrasis: cuando se cuenta, resume o reorganice con palabras propias las ideas del autor. *Ejemplos:*

Interpretando los resultados, podría afirmarse, según García (2021), que....

Interpretando los resultados, podría afirmarse que la tasa de crecimiento.... (García, 2021).

Cantidad de autores en las citas: para el caso del mismo autor con obras publicadas en el mismo año, se sigue el siguiente formato (García, 2008a, p. 12) o García (2008b, p. 24). Si son dos o tres autores, se colocarán solamente el primer apellido de cada uno, por ejemplo: Según Reyes y Díaz (2008, p. 90) o (Reyes, García y Díaz, 2008, p. 90). Si son más de tres autores (García et al., 2022). Siguiendo el mismo criterio explicado anteriormente para las citas textuales y las paráfrasis.

Las **citas secundarias** se utilizan cuando una fuente principal es referida en el texto. Puede citarse de dos formas:

Entre paréntesis: (Apellido del autor original, fecha, como se citó en Apellido del autor secundario, fecha)

Ejemplo: (Abreu, 2002, como se citó en Romero, 2012)

En forma narrativa: Apellido del autor original (fecha, como se citó en Apellido del autor secundario, fecha)

Ejemplo: Abreu (2002, como se citó en Romero, 2012) afirma que no todos los documentos narrativos son de fácil acceso.

Deben evitarse, en lo posible, citas de trabajos no publicados o en imprenta, también referencias a comunicaciones y documentos privados de difusión limitada, a no ser que sea estrictamente necesario. En caso de fuentes documentales, electrónicas u otras que por su naturaleza resulten inviables o complejas para la adopción del citado autor – fecha, puede recurrir al citado al pie de página. En casos más específicos, consulte las normas **APA en su 7ta edición**.

En el caso de documentos en archivos, los autores pueden recurrir al uso de notas al pie de página o a las normas **APA** para la referencia del contenido de los mismos, siempre y cuando mantengan coherencia en el estilo de citado a lo largo del trabajo, independientemente del método de citado para los documentos en archivos.

Referencias: Las fuentes citadas en el documento deben aparecer en la lista de referencias y cada entrada en la lista de referencia debe haber sido citada en el texto. Las referencias deberán ir al final del artículo, se realizarán tomando en cuenta las **normas de la American Psychological Association (APA) en su 7ma. edición actualizada** y aplicando las pautas establecidas en este apartado. Estas podrán ser bibliográficas, hemerográficas, documentales, electrónicas, orales y otras que se hayan utilizado. Tienen cuatro elementos básicos: autor, fecha de publicación, título del trabajo y fuente de recuperación. Deberán ir a interlineado sencillo y con sangría francesa de 1cm, con separación entre obras referenciadas de 6 pts. El orden de las referencias es alfabético por apellido.

Las diferentes obras de un mismo autor se organizarán cronológicamente, en orden ascendente y, si son dos obras o más de un mismo autor y año, se mantendrá el estricto orden alfabético por título. Los autores son responsables de la fidelidad de las referencias. Si un autor es citado más de una vez no se coloca la tradicional raya que sustituya los apellidos y nombres del

Instrucciones para los autores

Instructions for authors

autor o autores. Ello se explica porque los buscadores electrónicos de los repositorios institucionales leen palabras y la raya no posee ningún significado alfabético.

Las **normas APA versión 7 actualizadas** permiten referenciar hasta 20 y más de 20 autores. En el caso de hasta 20 autores, se separa el penúltimo del último con la letra “y”. En el caso de más de 20 autores, se escriben los primeros 19, luego puntos suspensivos, seguidos del último autor de la obra. Ejemplos:

Libros

Apellido, inicial del Nombre del autor (año). *Título de la obra*. Casa o ente editorial [no debe llevar la palabra “editorial” a menos que forme parte del nombre de la institución editora].

Ejemplo de libro con un autor:

Vera, M. (2013). *Proyecto educativo republicano e instrucción pública en Maracaibo (1830-1850)*. Fondo Editorial UNERMB.

Briceño-Iragorry, M. (1997). *Mensaje sin destino*. Monte Ávila Editores.

Ejemplo de libro con dos autores:

Acosta, N. y Arenas, O. (1999). *América Latina en el Mundo*. Ediluz.

Ejemplo de libro con más de tres autores:

González, P. et al. (1999). *La innovación es un tema para discutir en países no desarrollados*. Kopena.

Ejemplo de libro obtenido de la web:

Real Academia Española (2011). *Nueva gramática de la lengua española. Manual*. Espasa.
<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/psicologia/article/view/27899/43273>

Capítulos de libros o parte de una compilación

Apellido, inicial del Nombre del autor (año). Título del capítulo o sección. *Título del libro* (páginas). Casa o ente editorial.

Ejemplo de capítulo de libro:

Abric, J. (2001). Las representaciones sociales: aspectos teóricos. *Prácticas sociales y representaciones* (25-41). Ediciones Coyoacán.

Artículo en revista arbitrada

Apellido, inicial del Nombre del autor (año). Título del artículo. *Nombre de la revista*, volumen o año, número.

Ejemplo de artículos en revista arbitrada impresa:

García J. y Colina, A. (2013). Mapas cognitivos: estrategia de enseñanza-aprendizaje en las ciencias sociales. *Perspectivas: Revista de Historia, Geografía, Arte y Cultura*, Año 1 N° 1.

Ejemplo de artículo en revista arbitrada con DOI (Digital Object Identifier):

Ramírez, L. (2015). El cultivo del cacao venezolano a partir de Maruma. *Historia Caribe*. Vol. 10, N° 27.
<https://doi.org/10.15648/hc.27.2015.3>

Ejemplo de artículo en revista arbitrada en línea sin DOI:

Castillo, L. y Borregales, Y. (2015). Más allá del pergamino: la pintura histórica y la caricatura política en el estudio historiográfico venezolano. *Procesos Históricos*. N° 027, Año XIV.
<http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/39640/1/articulo6.pdf>

Trabajos de grado/tesis inédita

Apellido, inicial del Nombre del autor (año). *Título del trabajo*. (Trabajo de grado/tesis de maestría/Tesis doctoral). Institución, Lugar.

Ejemplo de trabajo de grado/tesis inédita:

Lozano, E. (1999). *Casos de mercadeo en empresas colombianas*. (Trabajo de Grado). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Ejemplo de trabajo de grado/tesis inédita en línea:

Loaiza, M. (2015). *Casos de mercadeo y publicidad en empresas ecuatorianas*. (Tesis de Maestría). URL

Trabajos presentados en eventos científicos y/o conferencias

Apellido, inicial del Nombre del autor (mes, año). *Título del trabajo*. Trabajo presentado en <nombre de la conferencia> de <Institución organizadora>, lugar.

Instrucciones para los autores

Instructions for authors

Ejemplo de trabajos presentados en eventos científicos y/o conferencias:

García, J. y Durán, W. (mayo, 2013). *Empoderamiento comunal y gestión de riesgos en espacios comunales de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo. Retos y propuestas*. Trabajo presentado en las Jornadas Riesgos Naturales y Educación de la Facultad de Humanidades y Educación de la Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela.

Artículo de periódico

Apellido, inicial del Nombre del autor (año, mes y día). Título del artículo. *Título del periódico*, página.

Ejemplo de artículo de periódico:

Soto, A. (2015, septiembre, 23). PNL logra cambios de conducta en 20 minutos. *Versión Final*, p. 14.

Ejemplo de artículo de periódico en línea:

Chirinos, P. (2015, septiembre, 22). Caminata por un corazón sano. *La Verdad*. <http://www.laverdad.com/zulia/105830-caminata-por-un-corazon-sano.html>

Constituciones

Título de la constitución [Const.]. (fecha de promulgación). número de ed. Editorial.

Ejemplo de constitución:

Constitución de la República Bolivariana de Venezuela [Const.]. (1999). 3^{ra} edición. Ex Libris.

Leyes

Organismo que la decreta. (día, mes y año). *Título de la ley*. DO o GO: [Diario o Gaceta oficial donde se encuentra]

Ejemplo de leyes:

Asamblea Nacional de la República Bolivariana de Venezuela. (15 de agosto de 2009). *Ley Orgánica de Educación*. Gaceta Oficial N° 5.929 Extraordinaria.

Documentos en archivo

Nombre del archivo. *Sección en donde se ubica*. Libro o tomo. Legajo, Título o asunto del documento. Folio (s).

Ejemplo de documentos en archivo:

Archivo General de Indias. *Audiencia de Caracas*. Ayudas de costa. Legajo 943. N° 267. Informe de la contaduría general favorable a una petición de las Clarisas del Convento de Mérida de Maracaibo en el sentido de que se les diese de expolios del obispo Ramos de Lora lo necesario para hacer reparaciones. Madrid, 31 de marzo de 1796. ff.1r-2v.

Entrevistas

Nombre del entrevistado, realizada el día, mes año en Lugar (Lugar).

Ejemplo de entrevistas:

Humberto Chirinos, entrevista realizada el 07 de febrero de 2016 en el barrio Punto Fijo (Cabimas, Venezuela).

Páginas de internet

Apellido, inicial del Nombre del autor (año). Título de la entrada.

Ejemplo de página de Internet:

Ministerio del Poder Popular para la Educación (2014). Colección Bicentenario. http://www.me.gob.ve/sistemas/coleccion_bicentenario/index.php

Entrada de blog

Apellido, inicial del Nombre del autor (año). Título del post. [Entrada de blog].

Ejemplo de entrada de blog:

Moreno, D. (2014). Libro de trucos "Distribuciones basadas en Debian GNU/Linux". [La web del profesor Duglas Moreno]. <http://blogs.unellez.edu.ve/duglasmoreno/archives/85>

Podcast

Apellido, inicial del Nombre del productor. (día, mes y año). *Título del post* [Audio en podcast].

Ejemplo de Podcast:

Leto, J. (18 de enero de 2015). "Las Moscas" de Horacio Quiroga en *Noviembre Nocturno* [Audio en podcast]. http://www.ivoox.com/las-moscashoracio-quiroga-audiosmp3_rf_3967422_1.html

Instrucciones para los autores

Instructions for authors

Película

Apellido, inicial del Nombre del productor y Apellido, inicial del Nombre (director) (año). *Título de la película* [Película]. País de origen: Estudio.

Ejemplo de película:

Jácome, M. (Productora) y Arvelo, C. (director) (2007). *Cyrano Fernández* [Película]. Venezuela: Índigo Media.

Canción

Apellido, inicial del Nombre del escritor (año de copyright). *Título de la canción*. [Canción]. Lugar: Sello discográfico.

Ejemplo de audio:

Juanes. (2013). *La camisa negra* [Canción]. Universal Music Latino

Imagen (fotografía, pintura)

Apellido, inicial del Nombre del artista (Lugar, año). Título de la obra [Formato]. Lugar: Lugar donde está expuesta.

Ejemplo de imagen:

Kahlo, F. (1944). *La columna rota* [Pintura]. México: Museo Dolores Olmedo Patiño.

Imagen o video en línea

Apellido, inicial del Nombre (año). *Título o nombre de la imagen o video* [Archivo de video/imagen].

Ejemplo de video en línea:

Santos, D. (2012). *Apocalipsis ecológico* [Archivo de video]. <https://www.youtube.com/watch?v=JzAektg101M>

Twitter

Apellido, inicial de Nombre [@Usuario twitter] (Año, mes, día). Contenido del Tuit [Tuit].

Ejemplo de Twitter:

Santo-Domingo, J. [@teatromayor] (2015, enero, 19). Vangelis, compositor de las partituras originales de Blade Runner y Carros de fuego es autor de la música de Paisajes <http://bit.ly/luzcasalenvivo> [Tuit]. <https://twitter.com/teatromayor/status/557272037258186752>

Facebook

Apellido, inicial del Nombre [usuario en Facebook] (año, mes, día). *Contenido del post* [Estado de facebook] de (url)

Ejemplo de Facebook:

Hawking, S. [Stephenhawking] (2014, diciembre, 19). *Errol Morris' A Brief History of Time is a very respectful documentary, but upon a viewing last night, I discovered something profound and warming. The real star of the film is my own mother.* [Estado de Facebook] de <https://www.facebook.com/stephenhawking/posts/749460128474420>

Anexos: los anexos constituyen elementos complementarios del texto que refiera el lector a una parte del trabajo o fuera de él, con el propósito de ilustrar las ideas expuestas en el texto, ampliar o aclarar o complementar lo allí expresado. Los anexos son contabilizados como parte del número de páginas del escrito.

En el caso de figuras y cuadros, el autor podrá acompañar el original con las ilustraciones que estime necesarias. Las fotografías e ilustraciones deben ser enviadas en formato .jpg con un mínimo de 300 dpi de resolución. Las leyendas o pie de foto no deben hacer parte de las imágenes, por tanto, deben indicarse separadamente. Los anexos deberán estar numerados (Imagen 1, Ilustración 2, entre otros) y reseñados dentro del texto (Ver ilustración x). El fondo de los gráficos, tablas y cuadros deberán ser en blanco. Es responsabilidad del autor conseguir y entregar a la revista el permiso para la publicación de las imágenes que así lo requieran. Si bien se permiten los anexos a color, debe tomarse en cuenta que la revista en físico se imprime a escala de grises; en tanto que la versión electrónica aparece a color.

Observaciones en cuanto a redacción y estilo

- Las subdivisiones en el cuerpo del texto (capítulos, subcapítulos, entre otras) deben tener numeración arábiga, excepto la introducción, la conclusión y las referencias que no se numeran. Los subcapítulos se reseñarán en decimales (1.1, 1.2, 5.6,) en tanto que las subdivisiones de estos últimos deberán presentarse en letras consecutivas (a, b, c, d, sucesivamente).
- Los términos en latín, extranjerismos, así como títulos de obras científicas, artísticas y literarias deberán figurar en letra itálica o cursiva.
- La primera vez que se use una abreviatura, ésta deberá ir entre paréntesis después de la fórmula completa; sucesivamente se recurrirá únicamente a la abreviatura.
- El inicio de cada párrafo lleva sangría de 1 cm. La separación entre párrafos será de espaciado posterior en 6 puntos.
- Las notas de pie de página deberán aparecer en números arábigos.

Instrucciones para los autores

Instructions for authors

- f. Si bien se permite el uso de las notas al pie de página, éstas tendrán un carácter explicativo y ampliatorio (si amerita el caso) de las ideas planteadas en el trabajo. No se aceptará el uso de pie de página para los datos de citas ni referencias, a excepción de referencias de documentos en archivos.
- g. Los cuadros, gráficos, ilustraciones, fotografías, mapas y similares deben aparecer referenciados y explicados en el texto. Deben estar, asimismo, titulados, numerados e identificados secuencialmente y acompañados por sus respectivos pies de imagen y fuente(s), de la siguiente manera: Fuente: Apellido (s), año. Ej.: Fuente: Márquez, 2012.
- h. Los cuadros, tablas, gráficos, ilustraciones y similares deben ser, preferentemente, de elaboración propia (salvo que el trabajo presentado implique el análisis de anexos de autoría externa). La inserción de los mismos debe estar plenamente justificada y guardar estricta relación con la temática y/o aspectos tratados en el trabajo presentado.

Para más detalles en cuanto a la aplicación de las normas APA, consulte: <https://normas-apa.org/>

Instructions for authors

General considerations regarding the presentation and sending of manuscripts

Researchers and the general public interested in publishing their work in *PetroRenova Indexed*, can access the journal's website (https://indexed.petrorenova.com/index.php/petrorenova_indexed/index) to register, consult the policies and regulations, as well as the respective formats. By means of the option submit an article, fill in the required fields and upload the manuscript. You may also send it through the e-mail address provided at (indexed.petrorenova@gmail.com). If you use this method, you must send the manuscript in the format intended for the type of publication.

PetroRenova Indexed provides open access to its publications, under Creative Commons (BY-NC-SA) Attribution 4.0 International License. In this sense, all publications that are available on the portal can be downloaded in pdf format free of charge.

With the manuscript of the proposed paper, a written communication, signed by the author or authors, addressed to the Editorial Board of the journal, authorizing the submission of the paper for evaluation and publication, should be sent to the above-mentioned e-mail address. This communication must state that the proposed work is original, unpublished and is not simultaneously undergoing evaluation and arbitration process in another journal.

From the moment the work is accepted and published, the author(s) accept(s) the assignment of copyright to *PetroRenova Indexed*, through a form that will be sent to them by the editorial team. The editorial team reserves the right to apply changes in style and form to the manuscript. *PetroRenova Indexed* may publish the article in physical or electronic formats, including the Internet, databases and other information systems linked to the journal. Authors may use the final version of their article in any repository, website or print.

It is important to clarify that the data of the author(s) should be sent in an attached document, both in Spanish and English, including surname, first name, address, telephone, e-mail, Orcid, academic titles, institutional affiliation with mention of the country, current positions, societies to which they belong, studies completed or in progress, and recent publications.

Presentation of the works

Papers must present an abstract of 150 words maximum and four (4) keywords. Both the abstract and the keywords must be in Spanish and English. Likewise, the title and subtitle of the paper should also be presented in the aforementioned languages. The length of the paper should be between fifteen (15) and thirty-five (35) pages. All papers should be submitted on a single-sided, single-sided, letter-type paper, with continuous numbering and margins of two (2.5) centimeters on all sides. It is recommended to use the format for submission of papers available in the journal's website.

The text should be presented with 1.5-line spacing, in Arial font, size 11, with 6 pts. spacing between paragraphs. For footnotes and table contents, the size will be Arial font size 9, single spaced.

Work evaluation

All papers will be evaluated under the double-blind mode by a Referee Committee, made up of three (3) members of the Scientific Committee and two (2) specialists of recognized prestige, selected by the Editorial Committee of the journal, whose identities will not be known. The evaluation criteria are as follows:

- a. Formal or presentation criteria: 1) originality, pertinence and adequate length of the title, 2) clarity and coherence of the discourse, 3) adequate preparation of the abstract, 4) internal organization of the text, 5) all other criteria established in these rules.

Instrucciones para los autores

Instructions for authors

b. Content criteria: 1) evidenced knowledge domain, 2) scientific rigor, 3) theoretical and methodological basis, 4) actuality and relevance of the sources consulted and 5) contributions to existing knowledge.

Once received, the papers follow the following process, in an average time of 60 days: a) initially, receipt of the manuscript is acknowledged via e-mail; b) then, the Editorial Board performs a preliminary review (estimated time 10 days) to determine whether it complies with the Guidelines for the submission of papers; c) if it complies, it goes to arbitration (review of manuscripts, estimated time 20 days), a process in which qualified specialists evaluate the papers according to criteria of relevance, originality, contributions and scientific and academic rigor. The committee of referees will issue a verdict on the submitted work, which will consist of: (c-1) **Publishable**; (c-2) *Publishable with slight modifications*, involving those of form and style, with a view to adapting to the formal or presentation criteria of the journal; (c-3) **Publishable with substantial modifications**, involving those of substance and construction of the manuscript, with a view to adapting to the content criteria of the journal; c-4) **Not publishable**; d) if the work does not meet the minimum criteria present in these rules, the Editorial Committee will propose that it not be sent to the refereeing process; e) in any case, the editor of the journal will notify the author or authors, in writing, of the decision. In the event that the verdict of the referees differs one from the other (publishable/unpublishable), the article will be submitted to a new arbitration, until a unanimous decision is reached.

In case of a publishable decision with slight or substantial modifications, the author(s) will have a maximum of ten (10) days to send the modifications to the Editorial Committee at the following address: indexed.petrorenova@gmail.com. If the author(s) do not send the corrections within the established period, it is assumed that the author(s) are not interested in not publishing their work. If the author or authors decide not to publish their work, they must submit a communication in which they make clear the non-publication of the material sent in the journal.

The reviewers do not use generative AI or AI-assisted technologies to perform the evaluation or decision-making process of a manuscript, since the critical thinking and original evaluation necessary for this work are beyond the scope of such technology and there is a risk that the technology may generate incorrect, incomplete or biased conclusions about the manuscript.

The responsibility for the refereeing process and the final decision to publish the articles lies with the Editorial Committee, in the person of its director.

Editorial process

The Editorial Board of *PetroRenova Indexed* reserves the final word on the publication of articles and the issue in which they will be published. The order of publication and the thematic orientation of each issue will be determined by the Editorial Committee, regardless of the order in which manuscripts have been received and refereed. Based on this, authors will be informed of the issue and the approximate dates of publication. During this process, the Editorial Committee reserves the right to make adjustments and changes to ensure the quality of the publication. Originals will not be returned.

The author should be ready to receive communications from the journal by e-mail. He/she must also provide information on the research that supports the article, certify that the article is his/her own work and that it respects the intellectual property rights of third parties, by sending the aforementioned communications.

Article body

Language: Articles must be presented and written in native language; If it is Spanish, the complete article is written in Spanish and both the summary and the keywords are translated into English. If it is English, the complete article is written in English and both the summary and the keywords are translated into Spanish. Authors who wish to expand the scope of international readers can send their works in Spanish, English and in their native language other than the two mentioned, this guarantees a greater number of readers.

Title: It should be short, explanatory and contain the essence of the work. This title must be provided in both Spanish and English. The following criteria are established for writing the title: a) clarity; b) brevity (between 10 and 15 words are suggested); c) specificity and d) originality.

Author(s): Indicate the full names and surnames, professional titles, the name of the institution where the work was carried out or the institution to which the author belongs, ORCID with information such as researcher, city and country. The maximum number of authors is four (4).

Summary: No more than one hundred and fifty (150) words, in Spanish and English, in a single paragraph with single spacing. If the work is presented in another language, the summary must be written in that same language, in Spanish and English. When writing the summary, the objective of the work, the methods used, results and conclusions are outlined. The following criteria are established for writing the summary: a) precise; b) complete; c) concise and d) specific.

Keywords: Four (4) keywords must be included in Spanish and English. These descriptor words facilitate the inclusion of the article in international databases. It is suggested to use the UNESCO thesaurus available at: <https://vocabularies.unesco.org/browser/thesaurus/es/>

Instrucciones para los autores

Instructions for authors

Sections and sub-sections: The works must be divided into introduction, theoretical foundations, methodology, results, analysis and discussion of the results, conclusion or final considerations and bibliographic references. In the development, the sub-sections must have Arabic numerals, being freely titled and divided by the author, seeking to maintain internal coherence of both discourse and theme.

Citation and reference standards

Appointments: The appointment will be made taking into account the standards of the **American Psychological Association (APA) in its 7th. updated edition** and applying the guidelines established in this section. In the text, the author-date and page number modality are used in the case of textual citations.

Textual citation: the author's words are reproduced exactly. If the citation is up to 40 words, it is incorporated into the text between double quotes, without italics. *Examples:*

1. Author last name (year) states that "text of citation" (page).

According to the results, Almarza (2020) states that "text of the citation" (p. 5).

2. "text of the citation" (author's last name, year, page).

"social classes are distinguished..." (Almarza, 2020, p. 3).

If the citation has more than 40 words, it is written separately from the text, in a block, indented 1 cm from the left margin, without quotation marks, without italics and with single spacing. At the end of the citation, the period is placed, followed by the author's last name, year and page number, in parentheses. *Examples:*

Consequently,

Citation text. (González, 2012, p. 4)

In the case of the narrative textual citation,

For his part, Alfonso (2012) states that

Citation text. (p.6)

Paraphrase-type citation: when the author's ideas are told, summarized or reorganized in their own words. *Examples:*

Interpreting the results, it could be stated, according to García (2021), that....

Interpreting the results, it could be stated that the growth rate.... (García, 2021).

Number of authors in the citations: in the case of the same author with works published in the same year, the following format is followed (García, 2008a, p. 12) or García (2008b, p. 24). If there are two or three authors, only the first surname of each one will be included, for example: According to Reyes and Díaz (2008, p. 90) or (Reyes, García and Díaz, 2008, p. 90). If there are more than three authors (García et al., 2022). Following the same criteria explained above for textual citations and paraphrases.

The **secondary appointments** They are used when a main source is referred to in the text. It can be cited in two ways:

In parentheses: (Original author's last name, date, as cited in Secondary author's last name, date)

Example: (Abreu, 2002, as cited in Romero, 2012)

In narrative form: Original author's last name (date, as cited in Secondary author's last name, date)

Example: Abreu (2002, as cited in Romero, 2012) states that not all narrative documents are easily accessible.

Citations of unpublished or printed works, as well as references to private communications and documents of limited dissemination, should be avoided, as far as possible, unless strictly necessary. In the case of documentary, electronic or other sources that, due to their nature, are unfeasible or complex for the adoption of the aforementioned author - date, you can resort to the one cited in the footer. In more specific cases, consult **APA standards in its 7th edition**.

In the case of documents in archives, authors can resort to the use of footnotes or **APA standards** to reference their content, as long as they maintain consistency in the citing style throughout the work. Regardless of the citing method for documents in archives.

References: Sources cited in the document must appear in the reference list and each entry in the reference list must have been cited in the text. References should go at the end of the article; they will be made taking into account the standards of the **American Psychological Association (APA) in its 7th. updated edition** and applying the guidelines established in this section. These may be bibliographic, newspaper, documentary, electronic, oral and others that have been used. They have four basic elements: author, publication date, title of the work and recovery source. They must be single-spaced with a French

Instrucciones para los autores

Instructions for authors

indentation of 1cm, with a spacing of 6 pts spaces between referenced works. The order of references is alphabetical by last name.

The different works by the same author will be organized chronologically, in ascending order and, if there are two or more works by the same author and year, the strict alphabetical order by title will be maintained. The authors are responsible for the fidelity of the references. If an author is cited more than once, the traditional line that replaced the surnames and names of the author or authors is not placed. This is explained because the electronic search engines of institutional repositories read words and the line does not have any alphabetical meaning.

The **APA version 7 standards** allow referencing up to 20 and more than 20 authors. In the case of up to 20 authors, the penultimate is separated from the last with the letter "y". In the case of more than 20 authors, the first 19 are written, then ellipses, followed by the last author of the work. The examples presented below correspond to the **APA-2023 standards**.

Books

Last name, initial of the author's name (year). *Title of the work*. Publishing house or entity [should not have the word "publishing" unless it is part of the name of the publishing institution].

Example of a book with an author:

Vera, M. (2013). *Republican educational project and public instruction in Maracaibo (1830-1850)*. UNERMB Editorial Fund.

Briceño-Iragorry, M. (1997). *Message without destination*. Monte Ávila Editores.

Example of a book with two authors:

Acosta, N. and Arenas, O. (1999). *Latin America in the World*. Ediluz.

Example of a book with more than three authors:

González, P. et al. (1999). *Innovation is a topic to discuss in undeveloped countries*. Kopena.

Example of a book obtained from the web:

Royal Spanish Academy (2011). *New grammar of the Spanish language. Manual*. Espasa.
<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/psicologia/article/view/27899/43273>

Book chapters or part of a compilation

Last name, initial of the author's name (year). Chapter or section title. *Book title* (pages). House or publishing entity.

Book chapter example:

Abric, J. (2001). Social representations: theoretical aspects. *Social practices and representations* (25-41). Coyoacán Editions.

Article in refereed journal

Last name, initial of the author's name (year). Article title. *Name of the Journal*, volume or year, number.

Example of articles in a printed refereed Journal:

García J. and Colina, A. (2013). Cognitive maps: teaching-learning strategy in the social sciences. *Perspectives: Journal of History, Geography, Art and Culture*, Year 1 No. 1.

Example of an article in a peer-reviewed journal with DOI (Digital Object Identifier):

Ramírez, L. (2015). The cultivation of Venezuelan cocoa from Maruma. *Caribbean History*. Vol. 10, No. 27.
<https://doi.org/10.15648/hc.27.2015.3>

Example of an article in a peer-reviewed online journal without DOI:

Castillo, L. and Borregales, Y. (2015). Beyond the parchment: historical painting and political caricature in the Venezuelan historiographic study. *Historical Processes*. No. 027, Year XIV.
<http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/39640/1/articulo6.pdf>

Unpublished degree works/thesis

Last name, initial of the author's name (year). *Job title*. (Degree work/master's thesis/doctoral thesis). Institution, Place.

Example of degree work/unpublished thesis:

Lozano, E. (1999). *Marketing cases in Colombian companies*. (Degree Work). Pontifical Javeriana University, Bogotá, Colombia.

Example of unpublished degree work/thesis online:

Loaiza, M. (2015). *Marketing and advertising cases in Ecuadorian companies*. (Master's Thesis).

Instrucciones para los autores

Instructions for authors

Works presented at scientific events and/or conferences

Last name, initial of the author's name (month, year). *Job title*. Paper presented at <conference name> of <organizing institution>, location.

Example of works presented at scientific events and/or conferences:

García, J. and Durán, W. (May, 2013). *Communal empowerment and risk management in communal spaces on the Eastern Coast of Lake Maracaibo. Challenges and proposals*. Work presented at the Natural Risks and Education Conference of the Faculty of Humanities and Education of the University of Zulia, Maracaibo, Venezuela.

Newspaper article

Last name, initial of the author's name (year, month and day). Article title. *Newspaper title*, page.

Example of a newspaper article:

Soto, A. (2015, September, 23). NLP achieves behavioral changes in 20 minutes. *Final Version*, p. 14.

Online newspaper article example:

Chirinos, P. (2015, September, 22). Walk for a healthy heart. *The truth*. <http://www.laVerdad.com/zulia/105830-caminata-por-un-corazon-sano.html>

Constitutions

Title of the constitution [Const.]. (date of promulgation). ed number Editorial.

Constitution example:

Constitution of the Bolivarian Republic of Venezuela [Const.]. (1999). 3rd Edition. Bookplate.

Laws

Body that decrees it. (day, month and year). *Title of the law*. DO or GO: [Official newspaper or Gazette where it is found]

Example of laws:

National Assembly of the Bolivarian Republic of Venezuela. (August 15, 2009). *Organic Law of Education*. Official Gazette No. 5,929 Extraordinary.

Documents on file

File name. *Section where it is located*. Book or volume. File, Title or subject of the document. Folio(s).

Example of documents on file:

General Archive of the Indies. *Caracas Hearing*. Coastal aid. File 943. No. 267. Report from the general accounting office favorable to a request from the Poor Clares of the Convent of Mérida in Maracaibo in the sense that they be given what was necessary to make repairs from the plunderings of Bishop Ramos de Lora. Madrid, March 31, 1796. ff. 1r-2v.

Interviews

Name of the interviewee, carried out on the day, month, year in (Place).

Example of interviews:

Humberto Chirinos, held on February 7, 2016 in the Punto Fijo neighborhood (Cabimas, Venezuela).

Internet pages

Last name, initial of the author's name (year). Entry title.

Example of Internet page:

Ministry of Popular Power for Education (2014). Bicentennial Collection. http://www.me.gob.ve/sistemas/coleccion_bicentenario/index.php

Blog post

Last name, initial of the author's name (year). Post title. [Blog entry].

Blog post example:

Moreno, D. (2014). "Distributions based on Debian GNU/Linux" cheat book. [Professor Duglas Moreno 's website]. <http://blogs.unelvez.edu.ve/duglasmoreno/archives/85>

Podcast

Last name, initial of the producer's name. (day, month and year). *Post title* [Audio in podcast].

Instrucciones para los autores

Instructions for authors

Podcast Example:

Leto, J. (2015, January 18). *"Las Moscas" by Horacio Quiroga in Noviembre Nocturno* [Audio in podcast]. http://www.ivoox.com/las-moscashoracio-quiroya-audiosmp3_rf_3967422_1.html

Movie

Last name, initial of the producer's first name and last name, initial of the first name (director) (year). *Movie title* [Film]. Country of origin: Studio.

Movie example:

Jácome, M. (Producer) and Arvelo, C. (Director) (2007). *Cyrano Fernandez* [Film]. Venezuela: Indigo Media.

Song

Last name, first initial of the writer (copyright year). *Song title*. [Song]. Place: Record label.

Audio example:

Juanes. (2013). *The black shirt* [Song]. Universal Music Latino

Image (photography, painting)

Last name, initial of the artist's name (Place, year). Title of the work [Format]. Place: Place where it is exposed.

Image example:

Kahlo, F. (1944). *The Broken Column* [Painting]. Mexico: Dolores Olmedo Patiño Museum.

Image or video online

Last name, first initial (year). *Title or name of the image or video* [Video/Image File].

Online video example:

Santos, D. (2012). *Ecological apocalypse* [Video file]. <https://www.youtube.com/watch?v=JzAektg101M>

Twitter

Last name, first initial [@Twitter User] (Year, month, day). Content of the Tweet [Tweet].

Twitter example:

Santo-Domingo, J. [@Teatromayor] (2015, January, 19). Vangelis, composer of the original scores for Blade Runner and Chariots of Fire, is the author of the music for Paisajes <http://bit.ly/luzcasalenvivo> [Tweet]. <https://twitter.com/teatromayor/status/557272037258186752>

Facebook

Last name, first initial [Facebook user] (year, month, day). *Content of the post* [Facebook status] from Url.

Facebook example:

Hawking, S. [Stephenhawking] (2014, December, 19). *Errol Morris' A Brief History of Time is a very respectful documentary, but upon a viewing last night, I discovered something profound and warming. The real star of the film is my personal mother* [Facebook Status] from <https://www.facebook.com/stephenhawking/posts/749460128474420>

Annexes: Annexes constitute complementary elements of the text that the reader refers to a part of the work or outside of it, with the purpose of illustrating the ideas presented in the text, expanding or clarifying or complementing what is expressed therein. The annexes are counted as part of the number of pages of the document.

In the case of figures and tables, the author may accompany the original with the illustrations he deems necessary. Photographs and illustrations must be sent in .jpg with a minimum of 300 dpi resolution. Captions or captions should not be part of the images therefore, they should be indicated separately. The annexes must be numbered (Image 1, Illustration 2, among others) and outlined within the text (See illustration x). The background of graphs, tables and charts must be white. It is the author's responsibility to obtain and deliver to the Journal permission for the publication of images that require it. Although color annexes are allowed, it should be taken into account that the physical Journal is printed in gray scale; while the electronic version appears in color.

Observations regarding writing and style

- Subdivisions in the body of the text (chapters, subchapters, among others) must have Arabic numbering, except for the introduction and conclusion, which are not numbered. The subchapters will be outlined in decimals (1.1, 1.2, 5.6,) while the subdivisions of the latter must be presented in consecutive letters (a, b, c, d, successively).
- Latin terms, foreign words, as well as titles of scientific, artistic and literary works must appear in italics or italics.

Instrucciones para los autores

Instructions for authors

- c. The first time an abbreviation is used, it must be placed in parentheses after the complete formula; successively, only the abbreviation will be used.
- d. The beginning of each paragraph is indented 1 cm. The separation between paragraphs will be subsequently spaced at 6 points.
- e. Footnotes must appear in arabic numerals.
- f. Although the use of footnotes is permitted, they will have an explanatory and expanding nature (if warranted) of the ideas raised in the work. The use of footers for citation or reference data will not be accepted, except for references to documents in files.
- g. Charts, graphs, illustrations, photographs, maps and similar must be referenced and explained in the text. They must also be titled, numbered and identified sequentially and accompanied by their respective image captions and source(s), as follows: Source: Last name(s), year. Ex.: Source: Márquez, 2012.
- h. Charts, tables, graphs, illustrations and the like must preferably be of your own creation (unless the work presented involves the analysis of annexes of external authorship). Their insertion must be fully justified and strictly related to the theme and/or aspects discussed in the work presented.

For more details regarding the application of APA norms, see: <https://normas-apa.org/>



PetroRenova

REVISTA CIENTÍFICA DE LA ENERGÍA

INDEXED

Esta revista electrónica es publicada en formato digital.
Editada por Petróleos & Renovables S. A., en alianza con el
Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño.