

Nombre de la actividad: Muestra de posters de la asignatura Química II

Curso: Química II

Docentes: Gina María Hincapié Mejía y Carlos Fidel Granda Ramírez

Programa: Ingeniería Ambiental

Objetivos de la actividad: Exponer un poster proveniente de una revisión bibliográfica en inglés de temas afines a la asignatura.

Productos a divulgar: Posters elaborados por los estudiantes.

ARQUITECTURA E INGENIERÍA

UV/H₂O₂ PROCESS

Members: Andrés Felipe Rivera López, Cristian Montoya Tuberquia, Erica Paola Martínez Ciro, María del Carmen Ochoa de Hoyos, Sarah Méndez Sánchez.

Course: Química II

Teacher: Gina Hincapié Mejía

Introduction

The combined UV/H₂O₂ process is one of the most effective Advanced Oxidation Processes (AOPs) for removing organic pollutants, microorganisms, and dyes from wastewater.

Ultraviolet radiation activates hydrogen peroxide, producing highly reactive hydroxyl radicals ($\cdot\text{OH}$) that degrade compounds resistant to conventional treatments.

Its application in the textile industry, bacterial disinfection, and emerging contaminant removal highlights its potential as a clean and sustainable technology for water treatment and reuse.

Chemical Models and Equations

- Photolysis of H₂O₂:



- Oxidation of organic compounds:



- Reduction of oxygen to H₂O₂ (in situ):



Methodologies

1. Dye degradation:

UV radiation (253.7 nm) + H₂O₂ (0.1–3 g/L) applied to model dyes. Monitoring by spectrophotometry and fluorometry.

2. Textile effluent treatment:

Textile wastewater (5 L) filtered and neutralized (1:10 dilution). 3×3 factorial design: [H₂O₂] = 0.05–0.15 M; UV = 15–75 W]. Evaluation by spectrophotometry (480–540 nm) and energy consumption.

3. Bacterial disinfection:

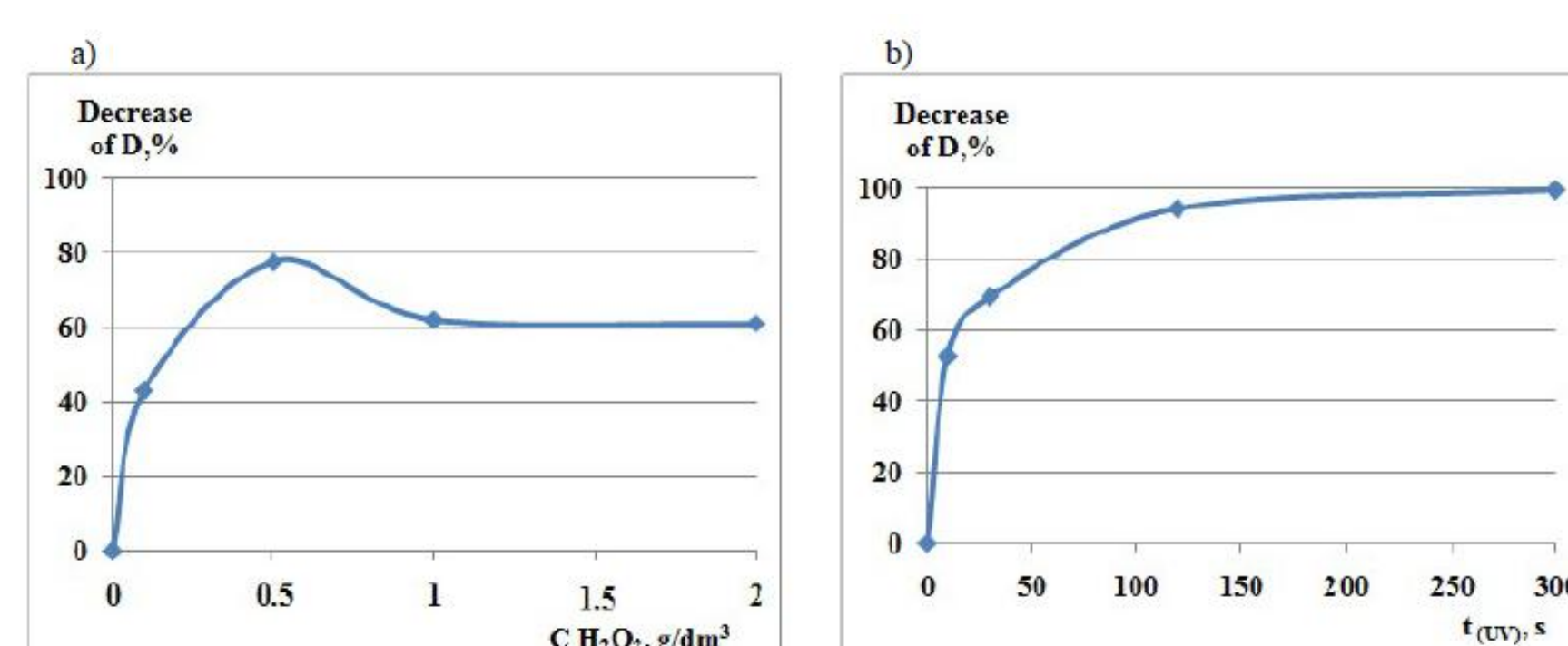
Electrochemical cell with carbon/PTFE cathodes calcined (340 °C, 5–25 min). Evaluation with *E. coli* and *S. aureus* based on bacterial reduction and H₂O₂ generation.

Results

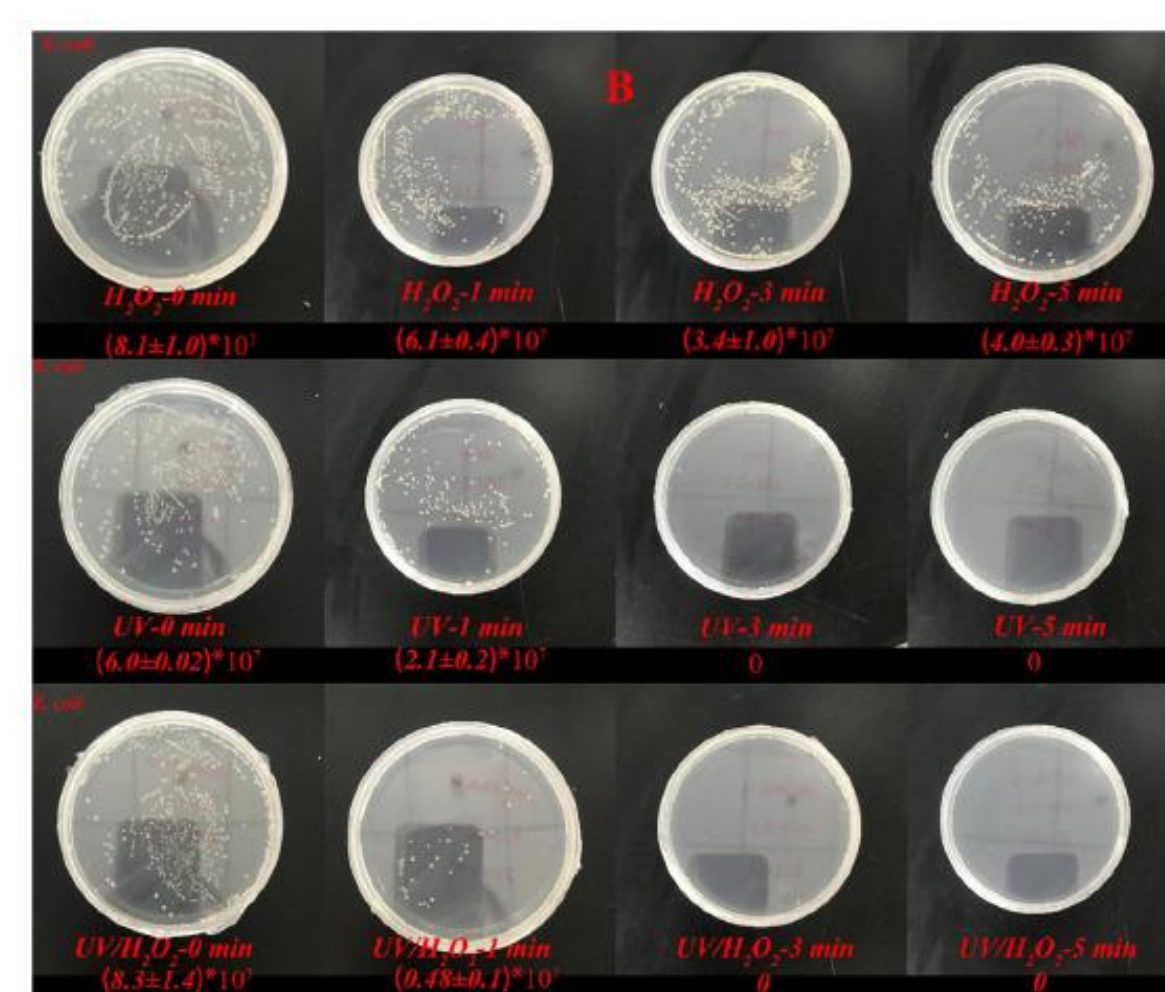
- Relative decrease in absorbance (decolorization) of the dye bromophenol blue (BPhB):

a: Variation of discoloration as a function of H₂O₂ concentration under UV radiation (30 s).

b: Variation of discoloration as a function of UV exposure time to a fixed concentration of H₂O₂ (1 g/L).



- Application for bacterial disinfection:



Images of flat colonies of *E. coli* treated with H₂O₂, UV radiation, and UV/H₂O₂ treatment at different treatment times, indicating the total number of bacteria.

Conclusions

- The UV/H₂O₂ process is more efficient than individual treatments, and its effectiveness depends on the balance between the generation and recombination of free radicals.
- The formation of hydroxyl radicals enables the degradation of persistent compounds and the elimination of microorganisms, significantly improving water quality.
- Its application is ecological and safe, making it especially useful for industrial and municipal water treatment, as well as for the removal of color, odor, and emerging contaminants.

References

- Simonenko E, Gomono A, Rolle N, Molodkina L. (2015). "Modeling of H₂O₂ and UV Oxidation of Organic Pollutants at Wastewater Post-treatment" *PROCEDIA ENGINEERING*. 117. 337-344. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.170>
- Yarce-Castaño J, Serrano-Arguello G, Chavarría-Chavarría F, Granda-Ramírez F, Hincapié-Mejía G. (2021). "Study of the effect of radiation intensity and H₂O₂ concentration in the treatment of effluent from the textile industry with UV/H₂O₂". *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*. 24(1):e22511308. <https://doi.org/10.25100/iyv.v24i1.11308>.
- Zhao Q, Li N, Liao C, Tian L, An J, Wang X. (2021). "The UV/H₂O₂ process based on H₂O₂ in-situ generation for water disinfection". *Journal of hazardous materials letters*. 2. 100020 <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2021.100020>



XXVI SEMANA DE LA FACULTAD

ARQUITECTURA E INGENIERÍA

Fenton and Photo-Fenton Processes

Sofia Rentería, Daniela Castaño, Isabella Del Castillo, Daniela Castro

Chemistry II

Professor: Gina Hincapié Mejía

Advanced oxidation with Fenton and photo-Fenton processes: an efficient alternative for the purification of contaminated water.

Introduction (Theoretical Framework)

The Fenton and photo-Fenton processes are advanced oxidation technologies (AOP) that have been extensively researched for the treatment of wastewater containing recalcitrant organic compounds. In the classic Fenton process, the reaction between iron ions (Fe^{2+}) and hydrogen peroxide (H_2O_2) generates highly reactive hydroxyl radicals ($\cdot\text{OH}$), capable of oxidizing organic molecules that are difficult to degrade. In the photo-Fenton process, irradiation (UV or visible) is incorporated, which promotes the regeneration of Fe^{2+} from Fe^{3+} and the additional production of $\cdot\text{OH}$ radicals, thus improving degradation efficiency. This theoretical framework covers the chemical fundamentals of both processes, their advantages and limitations, and their relevance in the current context of wastewater treatment.

Chemical Models and Equations

Key reactions in the Fenton process

- $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \cdot\text{OH} + \text{OH}^-$
- $\text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{HO}_2\cdot + \text{H}^+$

These reactions explain the generation of hydroxyl radicals from H_2O_2 in the presence of Fe^{2+} .

Reactions of the Photo-Fenton process

- $\text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O} + h\nu \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \cdot\text{OH} + \text{H}^+$

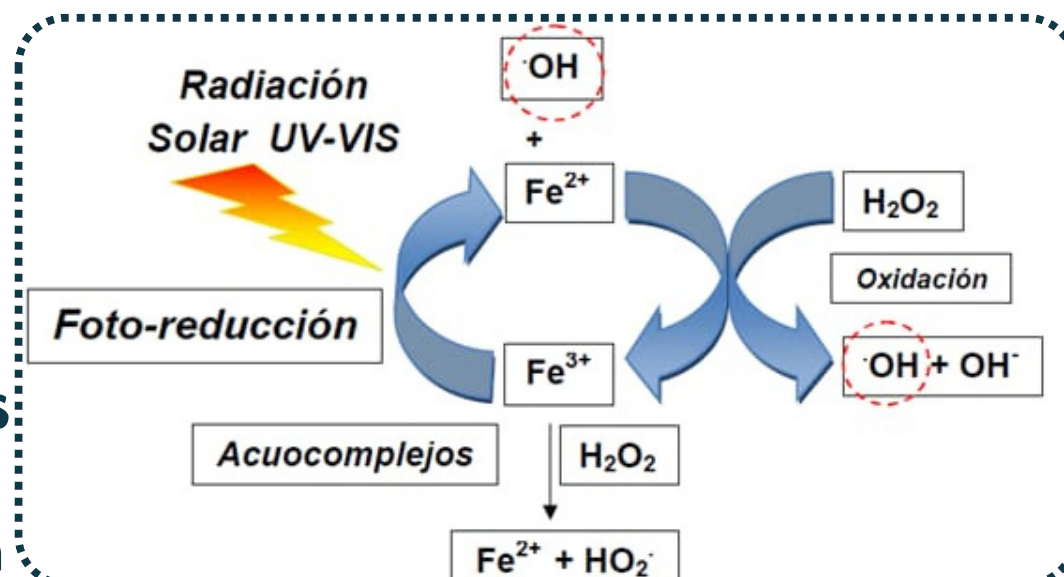
Here, irradiation ($h\nu$) facilitates the regeneration of Fe^{2+} and the generation of additional $\cdot\text{OH}$.

Kinetic models

Pseudo-first-order, pseudo-second-order, or other kinetic models adjusted to experimental data are used to describe the degradation of the contaminant (e.g., COD, BOD). For example, some studies have observed that the Fenton process follows pseudo-first-order kinetics, while photo-Fenton can be adjusted to second-order kinetics.

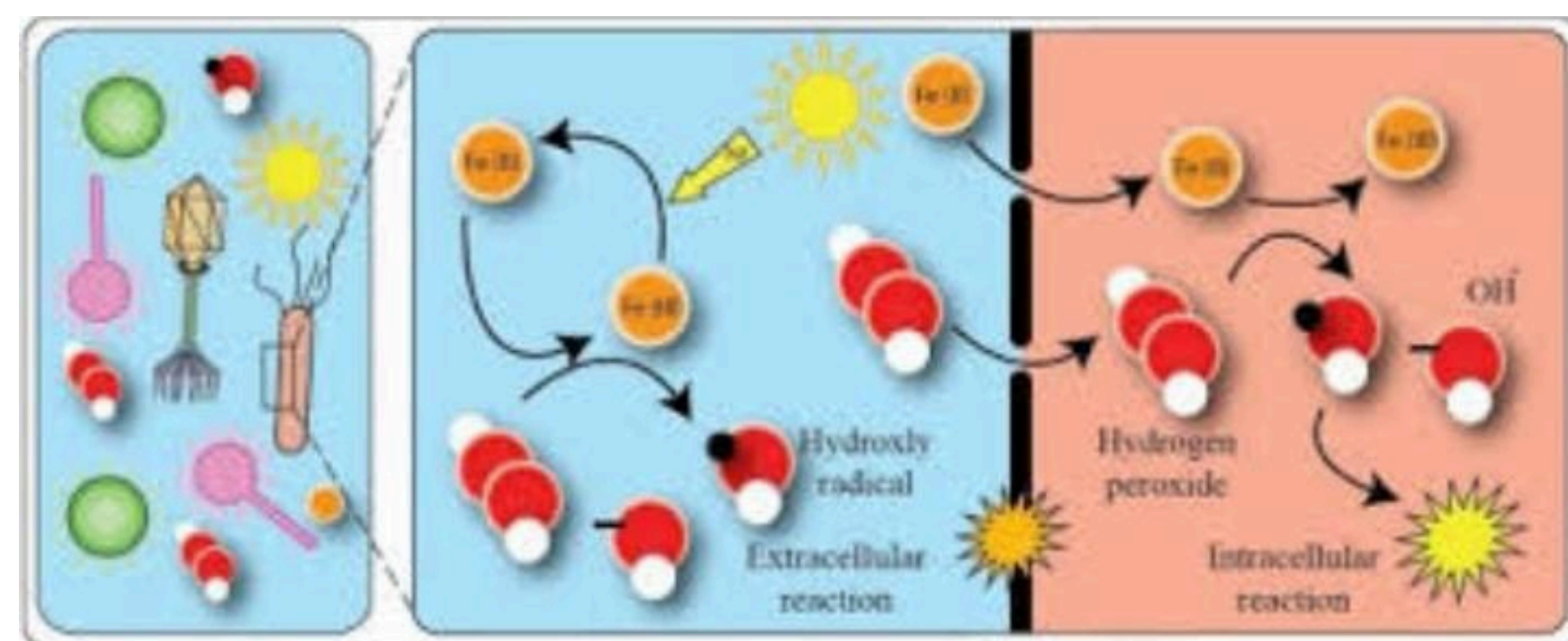
Operating parameters

Important relationships are included, such as the Fe^{2+} (or total Fe) dose, H_2O_2 concentration, pH of the medium, reaction time, and irradiance in the case of photo-Fenton. Optimizing these parameters is essential to maximize the efficiency of the process.



Results (Reported in Articles)

- In a study on distillery wastewater, the authors reported that the Fenton process achieved its highest COD removal efficiency with $\text{Fe}^{2+} = 1.25 \text{ g L}^{-1}$, $\text{H}_2\text{O}_2 = 1110 \text{ mg L}^{-1}$ and $\text{pH} = 3$; in contrast, the photo-Fenton process showed superior efficiency under UV irradiation and allowed for reduced reaction time and oxidant dosage.
- In a study using a model contaminant (phenol), it was observed that while the classic Fenton process achieved 41% mineralization, the UV-Fenton and solar-Fenton processes achieved 96-97% mineralization.

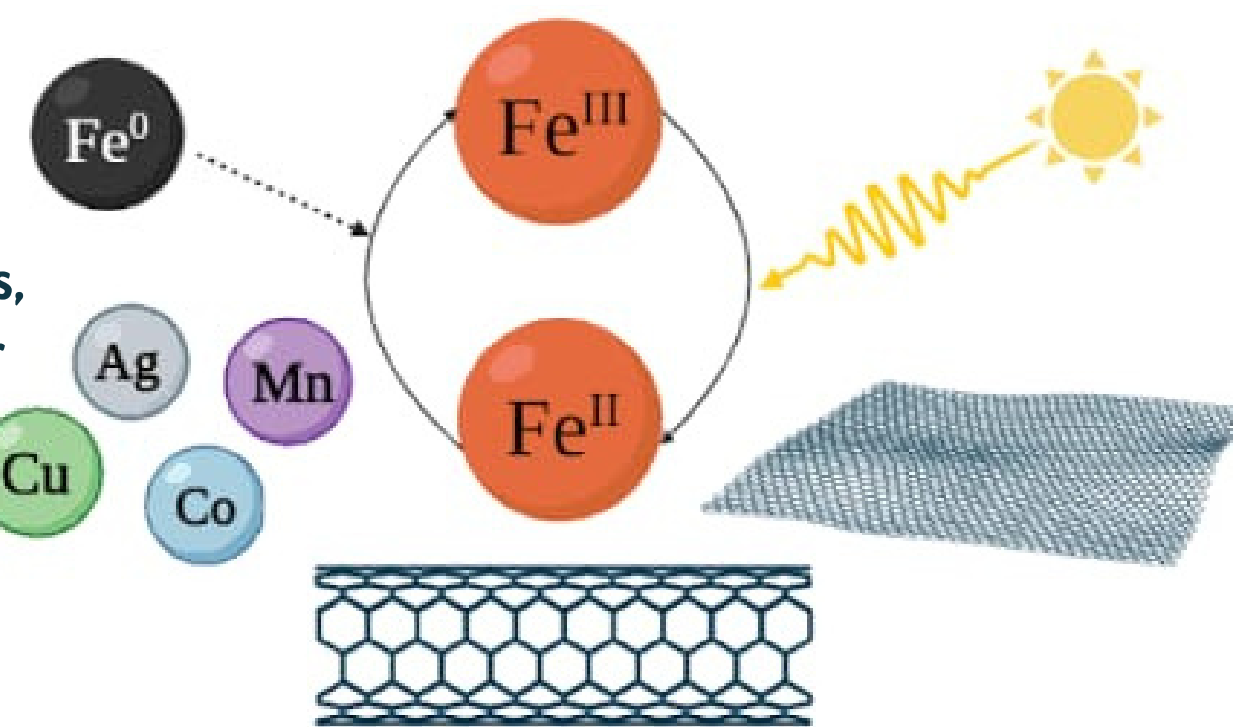


- In another case, for the treatment of effluent from the washing of soils contaminated with petroleum hydrocarbons, under optimal conditions ($\text{Fe}^{2+} = 0.1 \text{ g L}^{-1}$, $\text{H}_2\text{O}_2 = 1 \text{ g L}^{-1}$, $\text{pH} = 3$, time = 120 min), COD = 86.3% and TOC = 68% removal was achieved with photo-Fenton.
- Limitations also stand out: the narrow pH range (acidic) for optimal operation, generation of ferric sludge, high H_2O_2 consumption, and scaling challenges.

Conclusions

- Both the Fenton and photo-Fenton processes are efficient alternatives for the degradation of difficult organic pollutants in wastewater, offering high removal rates when key parameters are optimized.
- The photo-Fenton process has a clear advantage over conventional Fenton, thanks to irradiation that promotes Fe^{2+} regeneration, accelerates reaction kinetics, and typically allows for higher mineralization rates.
- However, there are operational and scalability challenges: the need for acidic pH, ferric sludge generation, high H_2O_2 consumption, and the fact that irradiation may involve costs or special infrastructure.
- For practical implementation on an industrial scale, it is essential to optimize operating parameters, consider iron recycling strategies, evaluate the toxicity of intermediate products, and study the economic and environmental viability of the system.

- Future lines of research could focus on: operating at neutral or moderate pH, developing reusable heterogeneous catalysts, combining photo-Fenton with other technologies (adsorption, membranes, electro-oxidation), and conducting pilot or full-scale studies



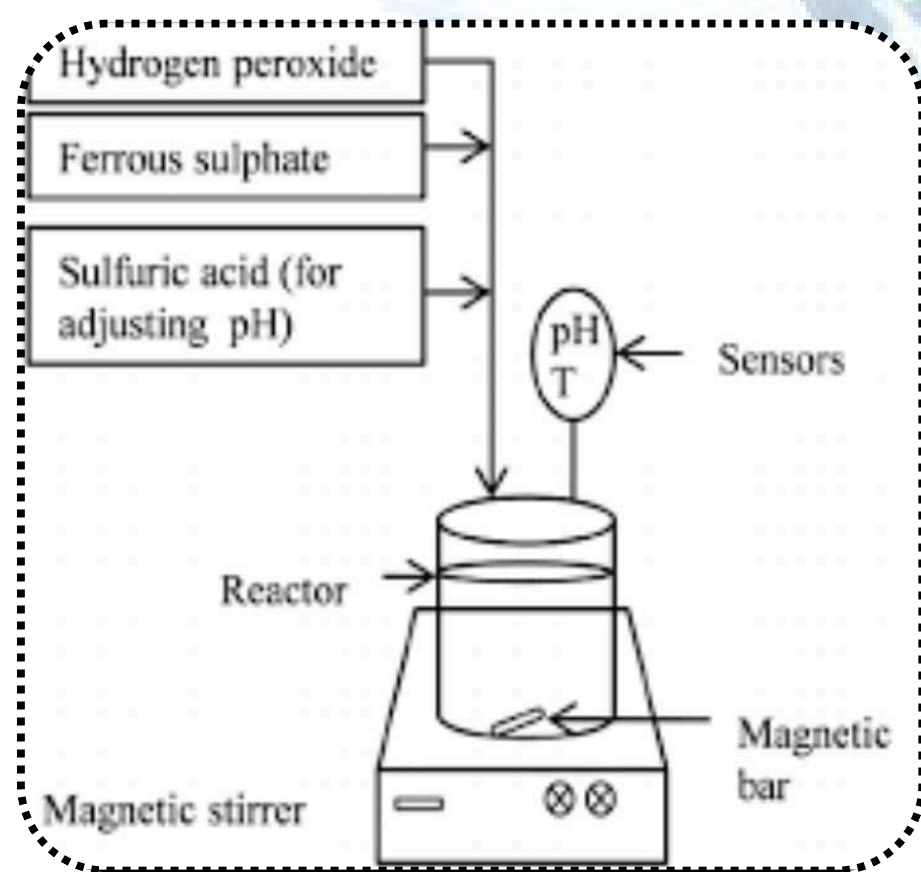
Glossary

COD: Chemical Oxygen Demand
BOD: Biochemical Oxygen Demand
TOC: Total Organic Carbon
AOP: Advanced Oxidation Technologies

Methodology (Reported in the Articles)

In the reviewed articles, the typical methodology encompasses the following steps:

- Characterization of the effluent (industrial, synthetic, or contaminated wastewater) by determining parameters such as pH, COD, BOD, and initial concentration of the target contaminant.
- Adjustment of the optimal pH (generally acidic, $\text{pH} \approx 2-4$ for conventional processes) and addition of Fe^{2+} and H_2O_2 in defined amounts.
- In the case of the photo-Fenton process, exposure of the system to UV or solar irradiation during treatment. Example: UV irradiation in the treatment of soils with solvents.
- Sampling at defined time intervals to measure contaminant removal (COD, BOD, TOC, color, etc.). Some studies also identify intermediate oxidation products.
- Kinetic modeling to fit experimental data to one or more degradation models, and statistical analysis of parameters such as reagent dosage, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}$ ratio, and time.
- Evaluation of additional aspects such as sludge generation, recyclability of the iron catalyst, impact of neutral pH, or approach to pilot scale.



References

- Machado, F., Teixeira, A. C. S. C., et Ruotolo, L. A. M. (2023). Critical review of Fenton and photo-Fenton wastewater treatment processes over the last two decades. International Journal of Environmental Science and Technology. doi:10.1007/s13762-023-05015-3 Colab
- Pirsaheb, M., Hossaini, H., Kiani Raad, N., Kianpour, S., et Hossini, H. (2022). A systematic review on photo-Fenton process as an efficient advanced oxidation for degradation of amoxicillin in aqueous environments. Reviews on Environmental Health, 38(2). De Gruyter Brill
- Keerthana Rani, M. S., Kuppusamy, S., et Sellappa, K. (2025). Comparative Study of Fenton and Photo-Fenton Processes for the Treatment of Distillery Wastewater: Pollutant Removal Efficiency and Kinetic Analysis. Global NEST Journal, 27(9).



INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA
COLEGIO MAYOR
DE ANTIOQUIA®

80
AÑOS
1945-2025



XXVI SEMANA DE LA FACULTAD

ARQUITECTURA E INGENIERÍA

HETEROGENEOUS PHOTOCATALYSIS FOR PHARMACEUTICAL WASTEWATER TREATMENT

Sandra Liney tuberquia Urrego

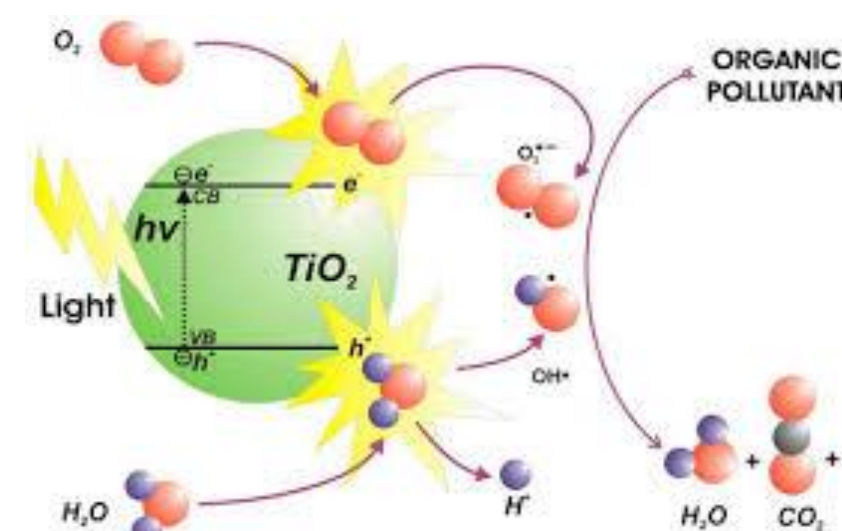
Course: Química II

Teacher: Gina Hincapié Mejía

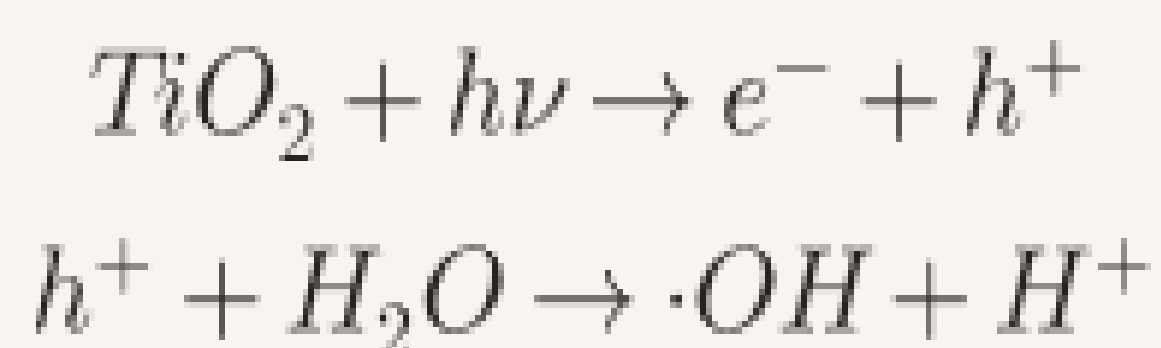


Environmental challenge: Pharmaceutical wastewater contains emerging contaminants (antibiotics, analgesics, hormones) that persist in the environment and act as endocrine disruptors, harming ecosystems and human health.

Innovative alternative: Heterogeneous photocatalysis (HPC) is an advanced oxidation process that uses semiconductor materials activated by light to degrade recalcitrant pollutants.



Chemical Models and Equations



- **g-C₃N₄/TiO₂ heterojunctions:** Improve charge separation and efficiency under visible light.
- **BiOX compounds:** Generate reactive oxygen species in the visible spectrum, expanding applicability.

Methodologies

- Castaño et al. (2021): Systematic review using PRISMA criteria and bibliometric analysis.
- Smýkalová et al. (2019): Experimental tests with TiO₂ and g-C₃N₄ for pharmaceutical degradation.
- Ahern et al. (2015): Characterization of BiOX photocatalysts for water treatment.

Results

- **Castaño et al.:** Optimal conditions: pH ≈ 6, [TiO₂] ≈ 40 ppm, irradiation ≈ 100 min.
- **Smýkalová et al.:** >80% degradation of diclofenac and ibuprofen with TiO₂/g-C₃N₄.
- **Ahern et al.:** BiOX achieved 73–100% degradation of pharmaceuticals under visible light.

Photocatalyst	Best performance	Under UV	Under VIS	Key point
TiO ₂ P25	☆☆☆	Very high	Low	Anatase/rutile mix → maximum efficiency with UV
TiO ₂ CG300	☆☆	High	Moderate	Large surface area, but less efficient than P25
g-C ₃ N ₄	☆☆☆	Low	Very high	Promising under visible light, sustainable, metal-free

Conclusions

- HPC is a promising technology for pharmaceutical wastewater treatment.
- Advanced materials (g-C₃N₄, BiOX) enable visible-light activation, reducing energy costs.
- Further optimization of kinetic models and operational conditions is needed for real-scale applications.



References

1. Castaño, L. I., Doria Herrera, G. M., & Grisales Castañeda, D. S. (2021). *Wastewater Treatment by Heterogeneous Photocatalysis: A Systematic Review*. Rev. Fac. Cienc. Básicas, 16(2), 51–64.
2. Smýkalová, V., et al. (2019). *Photocatalytic Degradation of Selected Pharmaceuticals Using g-C₃N₄ and TiO₂ Nanomaterials*. Nanomaterials, 9(9), 1194.
3. Ahern, J. C., et al. (2015). *Characterization of BiOX Compounds as Photocatalysts for the Degradation of Pharmaceuticals in Water*. Applied Catalysis B: Environmental, 179, 229–238.



XXVI SEMANA DE LA FACULTAD

ARQUITECTURA E INGENIERÍA

Fotocatálisis heterogénea con semiconductores metálicos para la degradación de contaminantes recalcitrantes y emergentes.

Members: Samuel Echeverry Restrepo, Santiago Sepúlveda González

Course: Química II

Teacher: Gina Hincapié Mejía

Introduction

- El crecimiento poblacional y económico ha incrementado la generación de residuos sólidos urbanos, creando desafíos ambientales. En Colombia, alrededor del 97% de los residuos se disponen en rellenos sanitarios, lo que genera lixiviados que contaminan el suelo y el agua. En Norte de Santander, este problema es crítico debido a la cercanía de los rellenos con fuentes hídricas.
- Los contaminantes emergentes, como productos farmacéuticos, aditivos alimentarios y compuestos de cuidado personal, han sido detectados en diferentes matrices ambientales aguas superficiales, subterráneas y efluentes de plantas de tratamiento como resultado de la actividad humana. Entre ellos, la **cafeína** se destaca por su alta frecuencia de detección, producto de su amplio consumo y excreción humana, así como por el vertimiento directo de bebidas a base de café o té

Chemical Models and Equations

- El **Proceso Avanzado de Oxidación (PAO)** utiliza **TiO₂ (Degussa P25)** y **H₂O₂** bajo radiación solar UV para generar especies reactivas de oxígeno altamente oxidantes, capaces de degradar contaminantes orgánicos complejos.



- En algunos experimentos, este óxido de zinc fue **modificado con plata (Ag) o hierro (Fe)** para mejorar su eficiencia:



Methodologies

- Se desarrolló un proceso de **fotocatálisis heterogénea** utilizando el **Método de Superficie de Respuesta (RSM)** para optimizar las variables de **pH, concentración de catalizador y energía acumulada**. Las muestras de lixiviado se pretrataron con el PAO y luego se sometieron a un **tratamiento biológico anaerobio (prueba SMA)** para evaluar la producción de metano y la eficiencia en la remoción de DQO.
- Para realizar el experimento, los investigadores **prepararon diferentes catalizadores** a base de **óxido de zinc (ZnO)** mezclado con **plata (Ag) y hierro(Fe)**. Usaron un **método de impregnación húmeda**, donde se mezcla el metal con el óxido de zinc y luego se seca y calienta para obtener el material. Después, analizaron las propiedades del material con pruebas de **difracción de rayos X y espectroscopía**, para conocer su estructura y cómo reaccionaba con la luz.

Results

- El acoplamiento de **PAO y SMA** mejoró la eficiencia de eliminación de **DQO y carbono orgánico** hasta en un **70–80%** comparado con los tratamientos, individuales. Esto demuestra que el pretratamiento con PAO aumenta la **biodegradabilidad del lixiviado**, facilitando su posterior degradación biológica.
- En los experimentos se probó cómo el **óxido de zinc (ZnO)**, al mezclarse con **plata y hierro**, ayudaba a eliminar la cafeína del agua usando luz ultravioleta. El mejor resultado se obtuvo con el **ZnO combinado con plata**, que logró **eliminar toda la cafeína en menos de dos horas**. En cambio, el **ZnO con hierro** no mejoró mucho el proceso. Además, cuando se usó solo la luz o solo el material sin luz, casi no hubo eliminación, lo que demuestra que la **combinación del material con la luz** es lo que realmente hace que el método funcione.

Conclusions

- La combinación de **fotocatálisis solar y tratamiento biológico anaerobio** es una alternativa **económica, eficiente y sostenible** para el manejo de lixiviados en regiones tropicales como Norte de Santander. Contribuye a la **protección de los recursos hídricos** y la **salud pública**.
- El estudio demostró que **usar óxido de zinc con plata** es una forma **efectiva y económica** para eliminar cafeína del agua. Este material funciona muy bien cuando se combina con **luz ultravioleta**, porque juntos logran degradar casi todo el contaminante. En cambio, el uso de hierro no mejoró los resultados. En general, esta técnica podría servir en el futuro para **limpiar el agua contaminada con otros productos químicos similares**.

References

Becerra, D., Caicedo, N., Velásquez, C., Machuca-Martínez, F., & Soto-Verjel, J. (2022). Heterogeneous Photocatalysis and an Anaerobic Biological Process for Leachate Treatment. *Ciencia En Desarrollo*, 13(2), 113–130.

<https://doi.org/10.19053/01217488.v13.n2.2022.13851>

Almeida, L. N. B., Pietrobelli, J. M. T. A., Lenzi, G. G., & Santos, O. A. A. (2020). Degradation of caffeine by heterogeneous photocatalysis using ZnO with Fe and Ag. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 63, e20180614. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2020180614>





XXVI SEMANA DE LA FACULTAD

ARQUITECTURA E INGENIERÍA

Procesos UV/PS y UV/PMS

Members: Ana Sofia López Sánchez, Juan Esteban Arango Rodriguez

Course: Química II

Teacher: Gina Hincapié Mejía

Actualmente es importante buscar métodos eficientes para la purificación del agua, entre estos se han destacado los procesos UV/PS y UV/PMS, que combinan luz ultravioleta con oxidantes. En UV/PS se generan radicales sulfatos ($\text{SO}_4^{\bullet-}$), y en UV/PMS también radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), lo que permite una degradación más eficaz de los contaminantes.

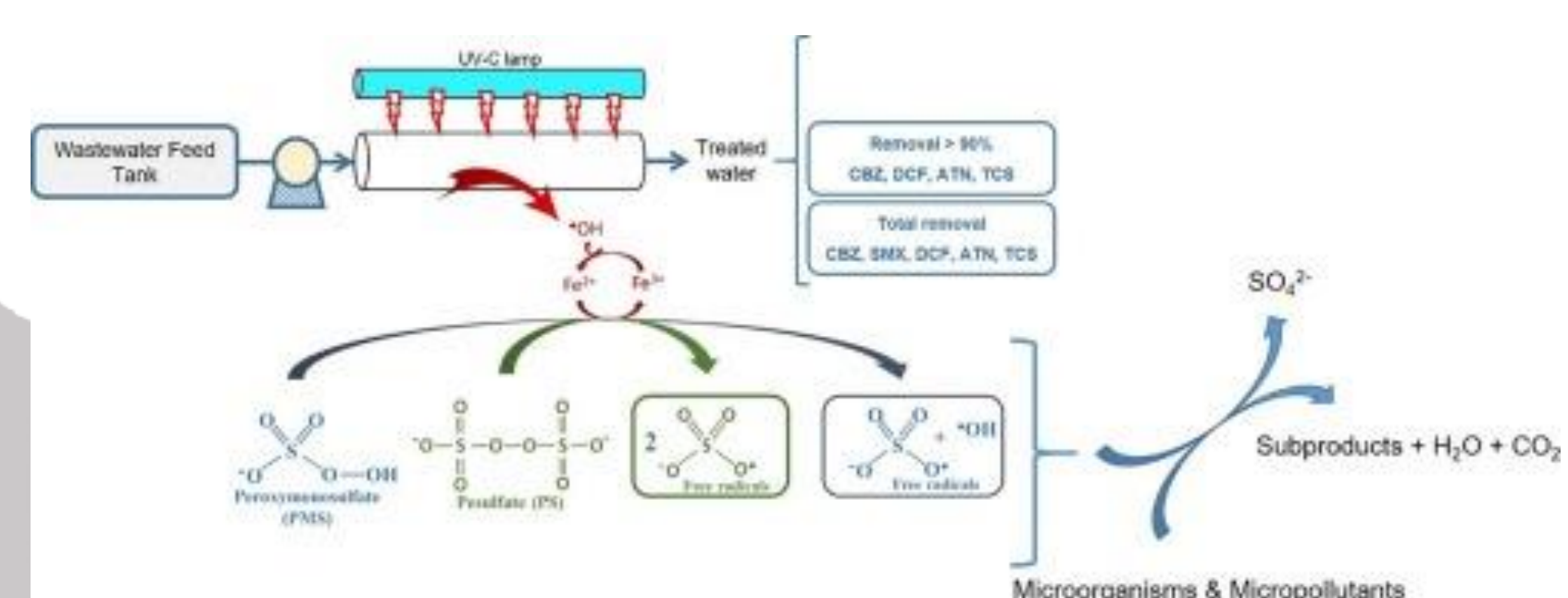
Intensification of UV-C tertiary treatment: Disinfection and removal of micropollutants by sulfate radical based Advanced Oxidation Processes

Metodología.

Procesos de oxidación avanzada con UV-C (254 nm), PMS/PS y Fe(II) para mejorar desinfección y eliminación de micropoluentes en efluentes reales.

Resultados.

- Fotólisis + baja dosis de oxidante $\rightarrow$ +25 % desinfección.
- PMS + UV-C: inactivación total bacteriana.
- Fe(II) + UV-C + oxidante: > 90 % remoción de contaminantes y > 50 % mineralización con bajo consumo.



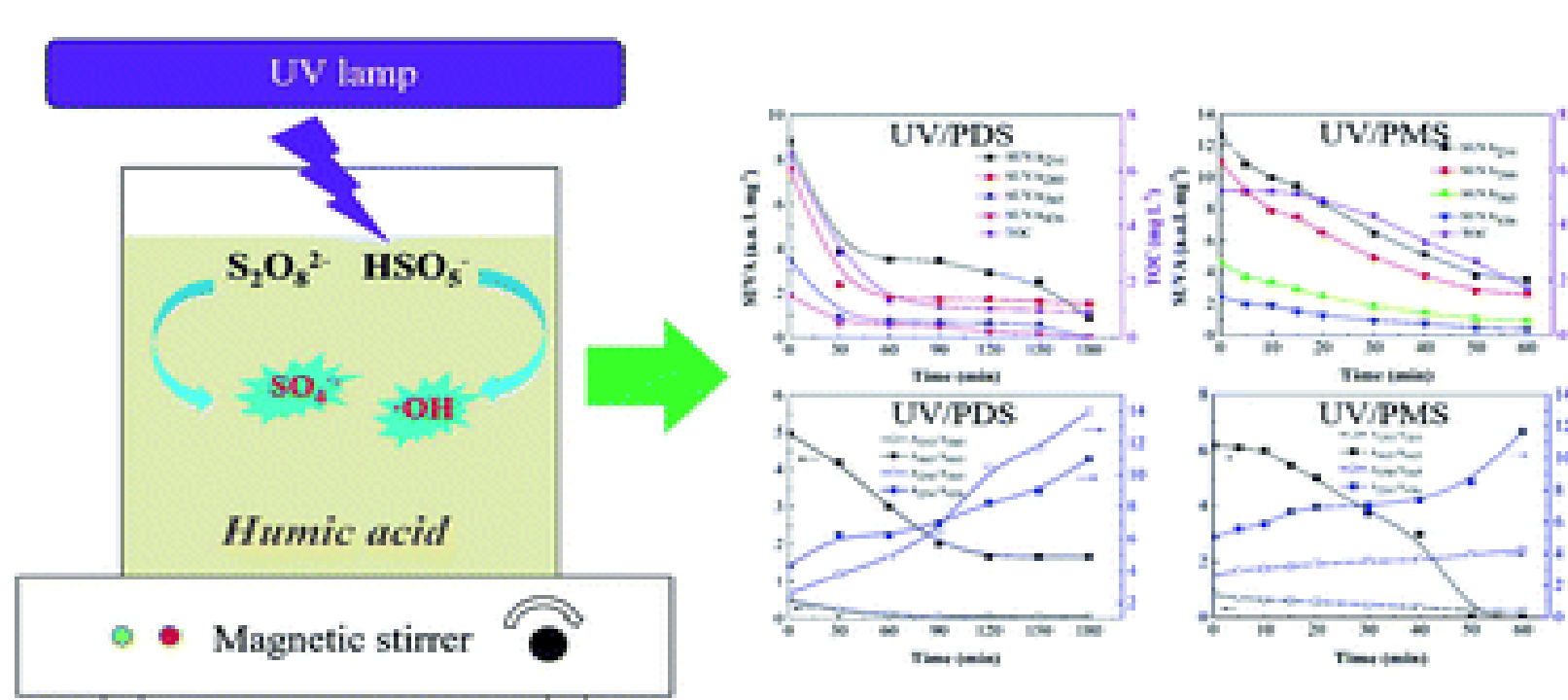
Elimination of humic acid in water: comparison of UV/PDS and UV/PMS.

Metodología.

Se estudió la eliminación de ácido húmico (HA) en agua mediante los procesos UV/PDS y UV/PMS, variando pH, dosis de oxidante, concentración inicial y presencia de aniones. Se analizaron los cambios estructurales del HA (UV-vis, SUVA) y la eficiencia energética (EE/O)

Resultados.

- **UV/PDS:** 92.9 % de eliminación (~180 min).
- **UV/PMS:** 97.1 % (~60 min), menor consumo energético (0.013 kWh m^{-3}).
- pH ácido y dosis moderadas optimizaron la degradación.



MODELO CINÉTICO

En estos procesos, la luz UV activa al persulfato (PS) o al peroximonosulfato (PMS) para formar radicales muy reactivos ($\text{SO}_4^{\bullet-}$ y $\bullet\text{OH}$), que oxidan y degradan los contaminantes del agua.

$$-\frac{d[C]}{dt} = k_{obs}[C]$$

donde:

[C] = concentración del contaminante

k_{obs} = constante de velocidad observada

Al integrar la ecuación:

$$\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = K_{obs}t$$

Esto significa que la **degradación sigue una cinética de pseudo-primer orden**, es decir, la **velocidad depende directamente de la concentración del contaminante** y del número de radicales generados.

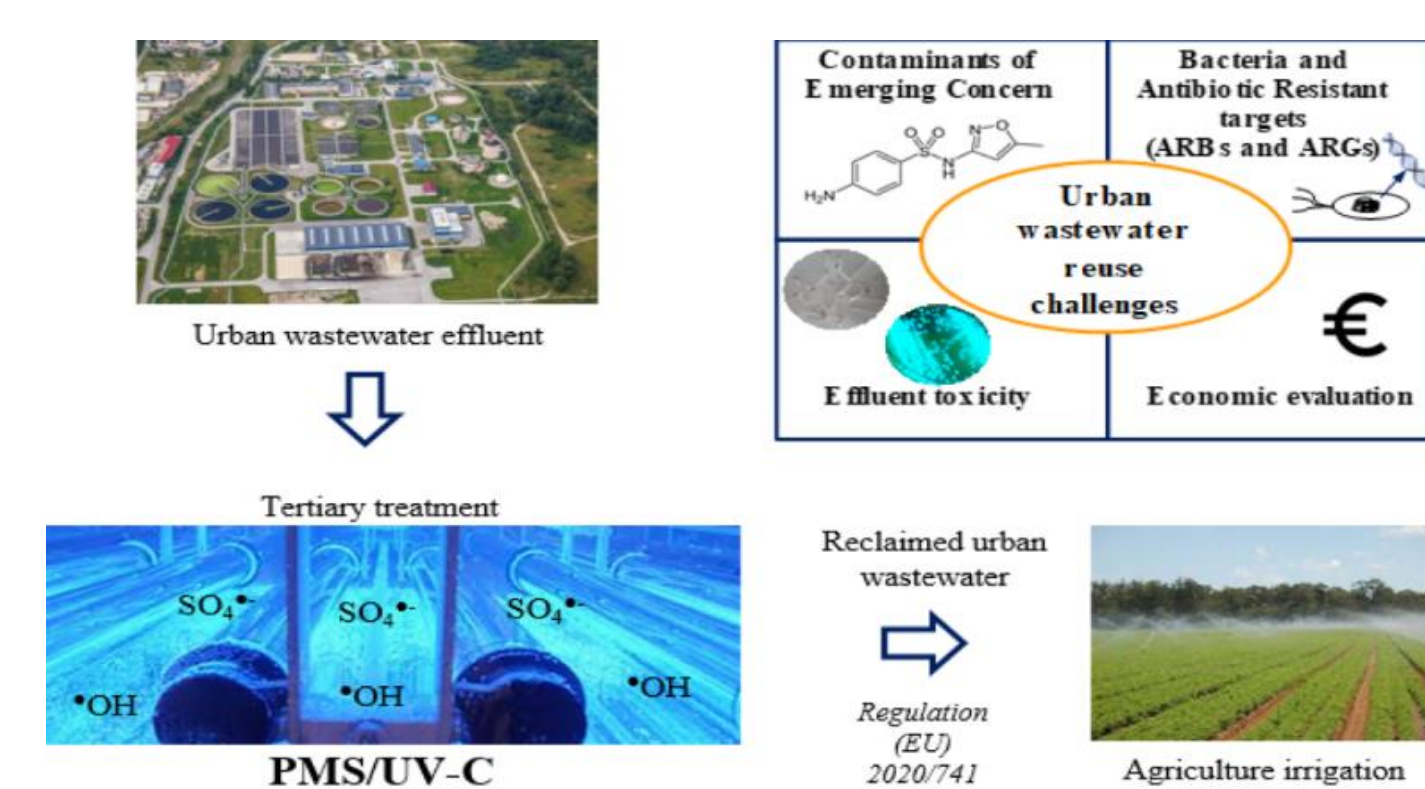
UV-C Peroxymonosulfate Activation for Wastewater Regeneration: Simultaneous Inactivation of Pathogens and Degradation of Contaminants of Emerging Concern

Metodología.

Tratamiento terciario con **UV-C + PMS/PS + Fe(II)** aplicado a efluentes urbanos reales. Se evaluaron diferentes dosis de UV-C (5.7–57 J/L) y oxidante (0.01–5 mM).

Resultados.

- +25 % en desinfección con baja dosis.
- UV/PMS: inactivación total de patógenos.
- Combinación UV-C + Fe(II) + PMS: > 90 % de eliminación y > 50 % mineralización.
- Baja toxicidad y consumo energético (~0.03 kJ/L).

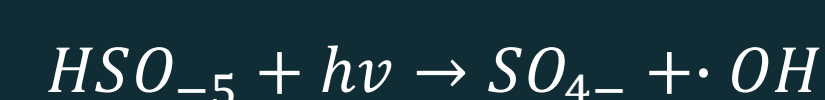


REACCIONES PRINCIPALES

UV / persulfato (PDS, $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$) — fotólisis:



UV / peroximonosulfato (PMS, $\text{HSO}_5^{\bullet-}$) — fotólisis:



- h = constante de Planck ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)
- ν (nu) = frecuencia de la radiación (en Hz)
- $h\nu$ = la energía de un fotón de luz

Conclusión

Finalmente, los artículos seleccionados demuestran que los procesos UV/PS y UV/PMS son métodos muy efectivos para limpiar el agua y eliminar contaminantes difíciles de tratar. En el estudio de Tang (2020) se observó que ambos procesos eliminan casi por completo el ácido húmico, pero el UV/PMS resultó más rápido y consumió menos energía. Por su parte, Rodríguez-Chueca(2018) encontraron que, al aplicar estos métodos en aguas residuales reales, se logra una desinfección total y una alta eliminación de fármacos, sobre todo cuando se combina la luz UV con Fe(II). Finalmente, Berruti (2021) mostraron que el UV-C/PMS puede eliminar al mismo tiempo microorganismos y contaminantes emergentes, haciendo el proceso ideal para reutilizar el agua de forma segura. En general, los tres trabajos concluyen que el proceso UV/PMS es el más eficiente y una opción prometedora, rápida y ecológica para el tratamiento moderno del agua.

Referencias

- Tang, S., Tang, J., Yuan, D., Wang, Z., Zhang, Y., & Rao, Y. (s. f.). Elimination of humic acid in water: Comparison of UV/PDS and UV/PMS. RSC Advances, 10(30), 17627–17634. <https://doi.org/10.1039/d0ra01787f>
- Berruti, I., Nahim-Granados, S., Abeledo-Lameiro, M. J., Oller, I., & Polo-López, M. I. (2021). UV-C Peroxymonosulfate Activation for Wastewater Regeneration: Simultaneous Inactivation of Pathogens and Degradation of Contaminants of Emerging Concern. Molecules, 26(16), 4890. <https://doi.org/10.3390/molecules26164890>
- Rodríguez-Chueca, J., García-Cañibano, C., Lepistö, R., Encinas, Á., Pellinen, J., & Marugán, J. (2018). Intensification of UV-C tertiary treatment: Disinfection and removal of micropollutants by sulfate radical based Advanced Oxidation Processes. Journal of Hazardous Materials, 372, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.04.044>



XXV SEMANA DE LA FACULTAD DE Arquitectura e Ingeniería

OZONO CATALÍTICO

Manuela, Stiven Estrada , Andrés Felipe Acevedo, Diana Isabel Hoyos
Química II
Ingeniería Ambiental
Profesora: Gina Hincapié Mejía

La aplicación de ozono catalítico se ha consolidado como una alternativa eficaz para el tratamiento y la remoción de contaminantes complejos en el ámbito ambiental. La creciente demanda de tecnologías capaces de degradar compuestos resistentes ha impulsado el desarrollo y la adopción de este proceso de oxidación avanzada, pese a retos como los costos operativos o la limitada infraestructura disponible. Las metodologías descritas muestran cómo el uso del ozono catalítico contribuye a cerrar brechas en la eliminación de contaminantes persistentes, fortaleciendo su papel como herramienta clave en los sistemas modernos de descontaminación ambiental.

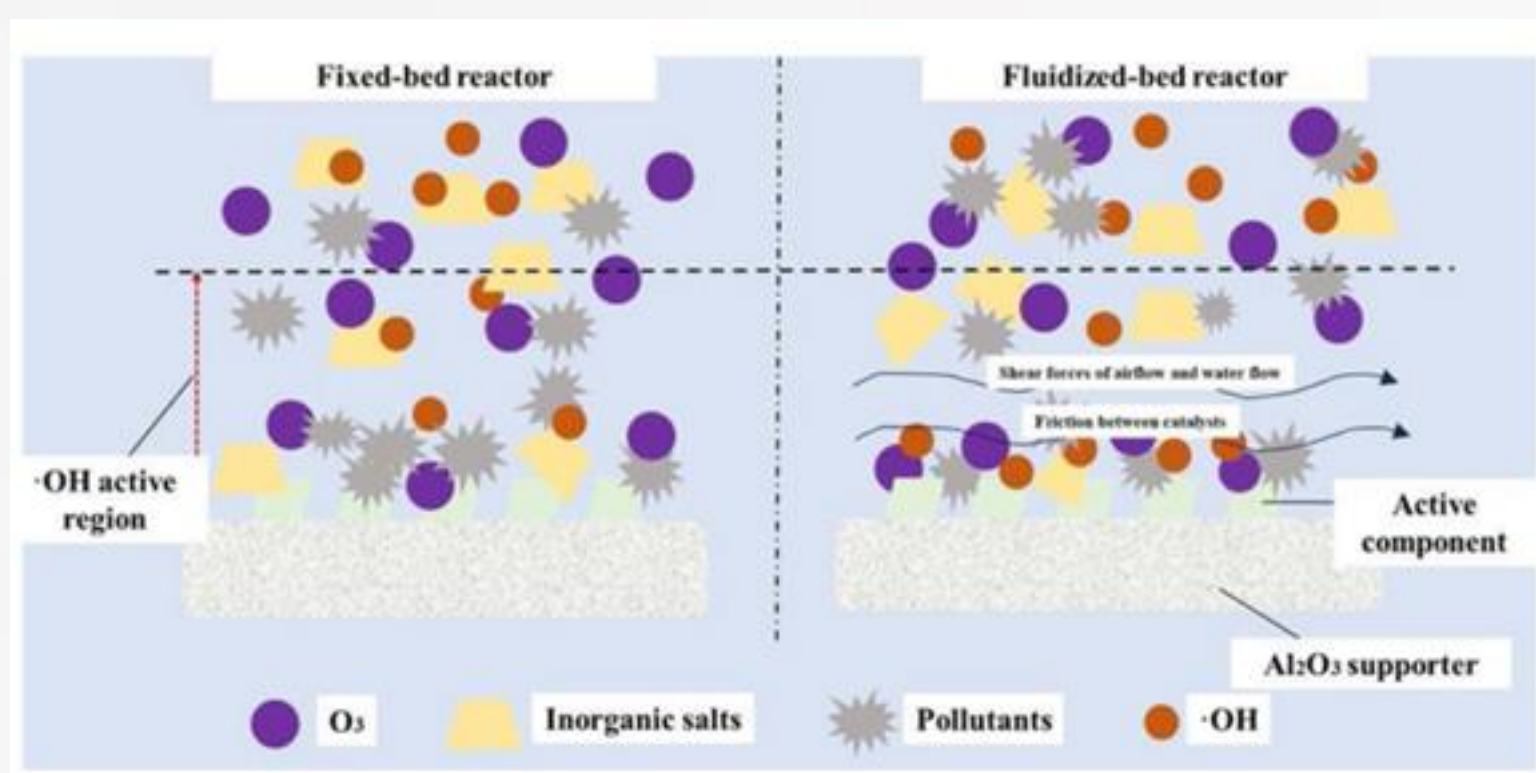
OZONO PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN RELLENOS SANITARIOS

Se destaca la capacidad para reducir contaminantes orgánicos recalcitrantes y mejorar la biodegradabilidad. Se analiza la implementación de estos procesos tanto como pretratamiento como postratamiento en combinación con métodos convencionales, evidenciando su alta efectividad en la remoción de parámetros como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y compuestos absorbentes de UV.

Parameters	Leachate		Literature Values	References	Releasing Patterns* (mg L ⁻¹)
	In natura	Treatment			
Aspect	Turbid	Limpid	-	-	Absence
Real Color (Pt-Co)	1412	42.35	-	-	Absence
Turbidity (NTU)	409	14.40	-	-	5-9
pH	7.80	7.0	7.2-8.6	**	8
Odor	Irritant	Absence	-	-	-
COD (mg O ₂ L ⁻¹)	1032	389.6	190-22300	**	60
BOD ₅ (mg O ₂ mg L ⁻¹)	476.1	185.0	< 20-8600	**	-
BOD ₅ /COD	0.45	0.475	0.02-0.80	**	-
COD (mg L ⁻¹)	465.5	87.26	70-27 700	***	-
Phosphorus (mg L ⁻¹)	10.41	1.58	0.1-15	**	-
N-NH ₃ (mg L ⁻¹)	0.45	< 0.01	0.4-1800	**	-
N-organic (mg L ⁻¹)	6.19	0.58	5-1200	**	-

* Article 18 CETESB and resolution CONAMA 357/05. (-) Not Specified.
**Souto and Povinelli (2006); Caetano (2009).
*** Pohland and Harper (1986); Rita (2002).

OZONIAZACION CATALITICA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS ORGANICAS CON ALTA SALINIDAD



El estudio comparó la ozonización catalítica en lecho fijo y lecho fluidizado para tratar aguas residuales salinas. Aunque el lecho fluidizado tiene menor adsorción y genera menos •OH, supera al lecho fijo gracias a su mejor contacto entre fases, cinética más rápida y mayor tolerancia a la sal. Mientras que el lecho fijo sufre una fuerte inhibición con el aumento de Na₂SO₄, el lecho fluidizado mantiene —e incluso mejora— la eliminación de contaminantes y la eficiencia en el uso del ozono. En conjunto, el lecho fluidizado demuestra un rendimiento más estable y robusto frente a la salinidad.

REMOCION DE CONTAMINANTES CRITERIO EN AGUAS DILUDAS CON PRESENCIA DE CONTAMINANTES RESISTENTES.

El tratamiento de OC es prometedora en términos de eficiencia y costo energético como tratamiento de efluentes industriales que poseen contaminantes de preocupación emergentes,

- Mejora las capacidades oxidativas del ozono
- Usa catalizadores que promueven su descomposición y la generación de especies radicales oxidantes.
- Capacidad de reaccionar con prácticamente cualquier compuesto presente en los efluentes.

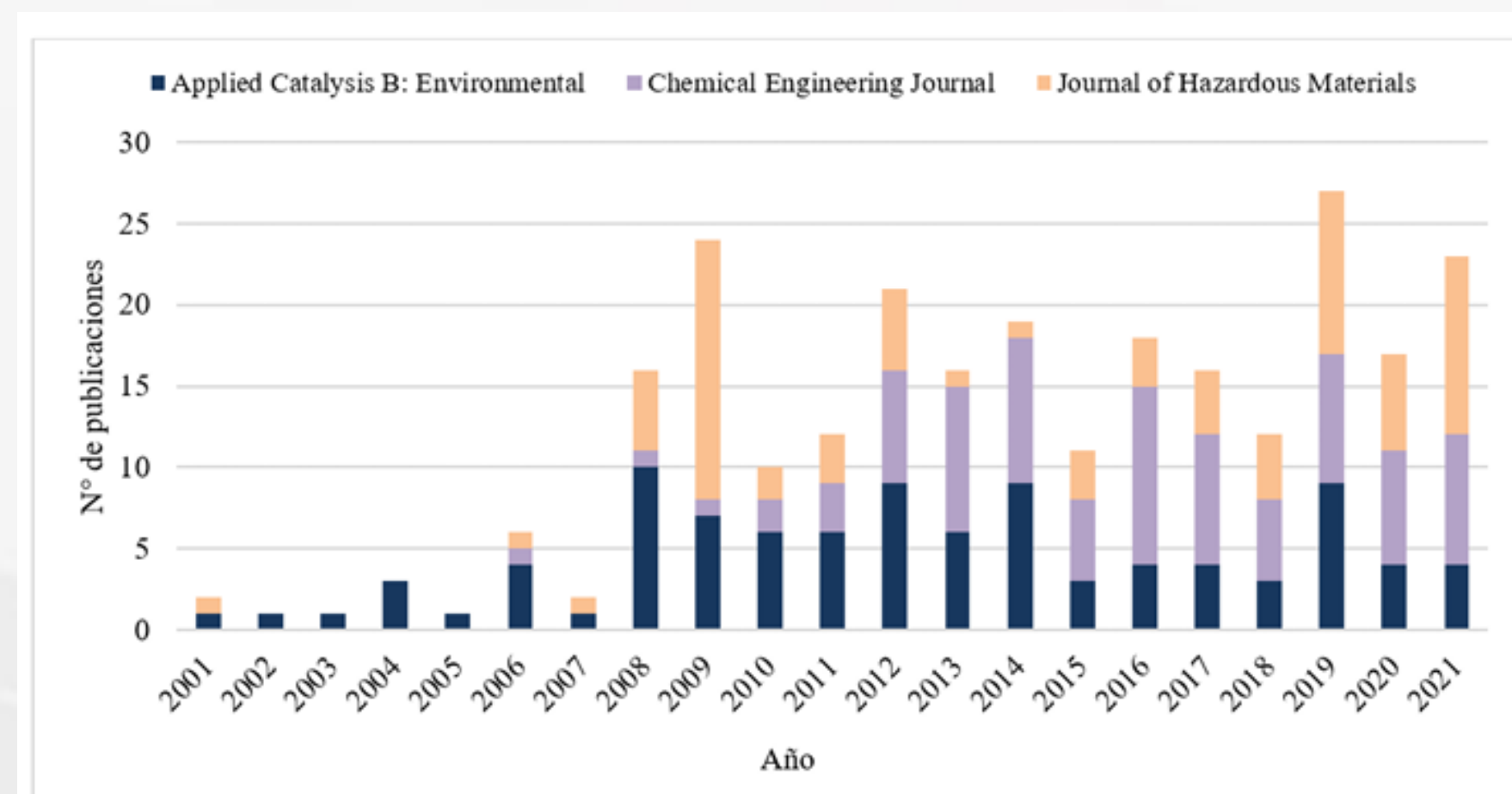


Imagen 1: Article 18 CETESB and resolution CONAMA 357/05. (-) Not Specified.
**Souto and Povinelli (2006); Caetano (2009).
*** Pohland and Harper (1986); Rita (2002).

Imagen 2 Fig. 7. (a) EPR spectra of DMPO-•OH in fixed-bed and fluidized-bed catalytic ozonation systems; (b) schematic diagram of the anti-interference mechanism in the fluidized-bed reactor

Imagen 3:2 Figura 10. Principales revistas que publican sobre OC. Fuente: propia con información de Scopus

Referencias

- Journal of Environmental Chemical Engineering journal homepage: www.elsevier.com/locate/jece
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118481> Received 19 March 2025; Received in revised form 1 August 2025; Accepted 3 August 2025 Journal of Environmental Chemical Engineering 13 (2025) 118481
- Ozonización catalítica en el tratamiento de aguas residuales: "Un análisis bibliométrico - INGENIERÍA QUÍMICA" Catalytic ozonation in treatment of wastewater: A bibliometric analysis
Astrid C. Angel-Ospina¹, Fiderman Machuca-Martínez¹ ¹Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Química, Cali, Colombia
astrid.angel@correounivalle.edu.co, fiderman.machuca@correounivalle.edu.co . Recibido: 30 de septiembre de 2021 – Aceptado: 1 de diciembre de 2021
- Título del artículo: Procesos avanzados de oxidación basados en ozono como alternativa de tratamiento para lixiviados de rellenos sanitarios Autor(es): Dorance Becerra-Moreno, Yrany Rubio-Gomez, Luisa Fernanda Ramírez-Ríos, Andrés Fernando Barajas-Solano, y Fiderman Machuca-Martínez Fecha de Recepción/Montaje: 20-feb-2021 Fecha de Aceptación: 27-May-2021 Correo del autor (de correspondencia): fiderman.machuca@correounivalle.edu.co
- Universidade de São Paulo (USP), Escola de Engenharia de Lorena (EEL), Departamento de Engenharia Química (LOQ), Lorena-SP, Brasil, *Autor correspondente: e-mail: andrelsfonte@hotmail.com, alcpeixoto@yahoo.com.br, helcio@dequi.eel.usp.br, cobraguimaraes@uol.com.br, ccaloures@hotmail.com, zeldals@hotmail.com, messias@dequi.eel.usp.br





XXVI SEMANA DE LA FACULTAD

ARQUITECTURA E INGENIERÍA

Tratamiento de gases

Stephania palacio Miranda: Diana Marcela Becerra

Química II

Ingeniería Ambiental

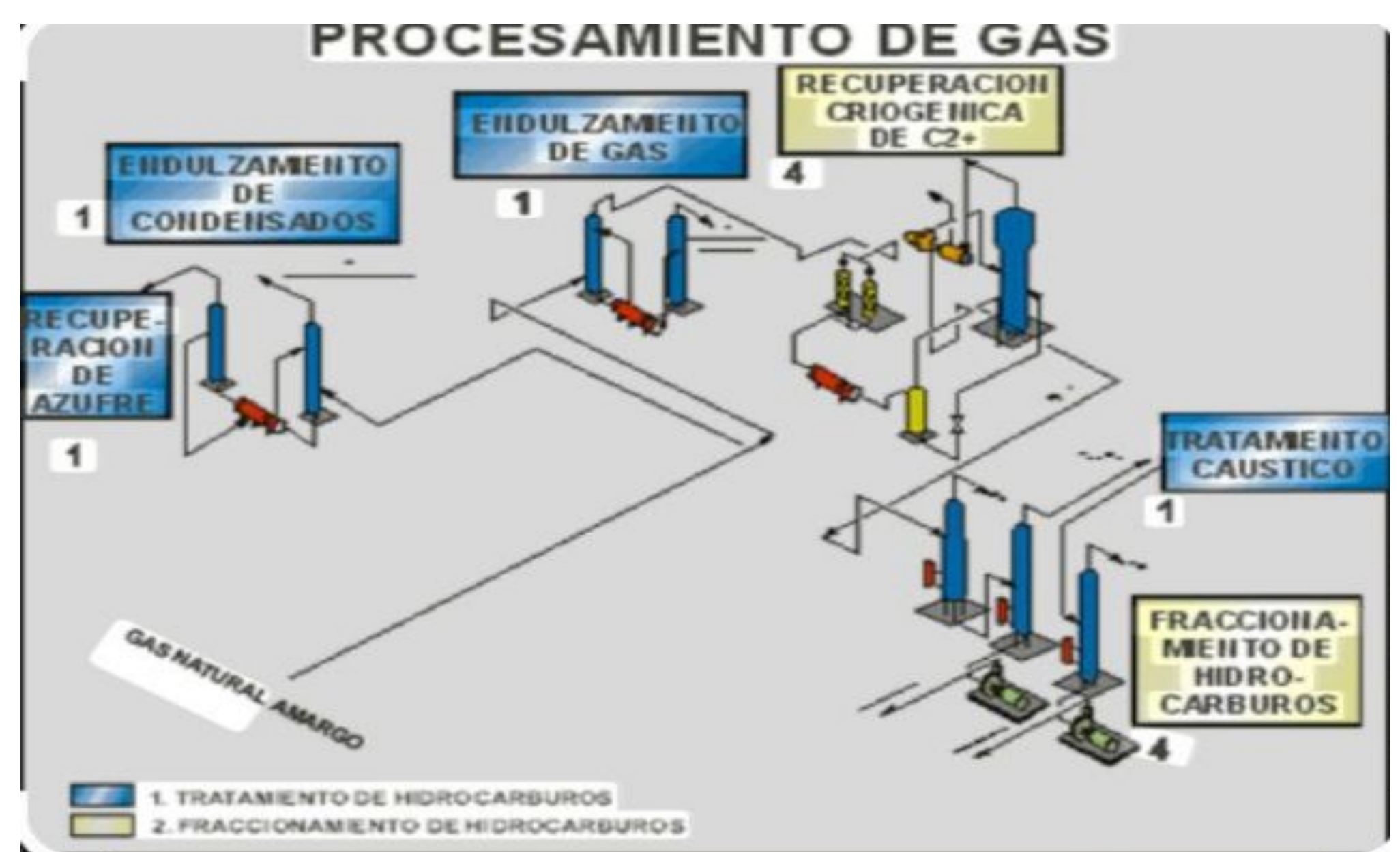
Docente: Fidel Granda

El tratamiento de gases es un conjunto de procesos físicos, químicos y mecánicos destinados a eliminar o reducir los contaminantes presentes en los gases emitidos por actividades industriales, de combustión o procesos químicos. Su objetivo principal es minimizar el impacto ambiental y proteger la salud humana, garantizando el cumplimiento de las normativas ambientales vigentes. Durante este proceso, los gases residuales se someten a diferentes etapas de depuración que pueden incluir filtración, absorción, adsorción, condensación o combustión controlada, dependiendo del tipo de contaminante y de la naturaleza del gas.

- **Procesos de separación para el tratamiento de gases de combustión industriales: métodos eficaces para el control global de la contaminación atmosférica industrial.**

Es una revisión sobre las tecnologías de tratamientos y depuración de gases de combustión generados por procesos industriales especialmente aquellos que usan combustibles fósiles; este artículo se centra en evaluar tecnologías disponibles para reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos, analizando su eficiencia, costos, ventajas y desventajas y perspectivas de desarrollo.

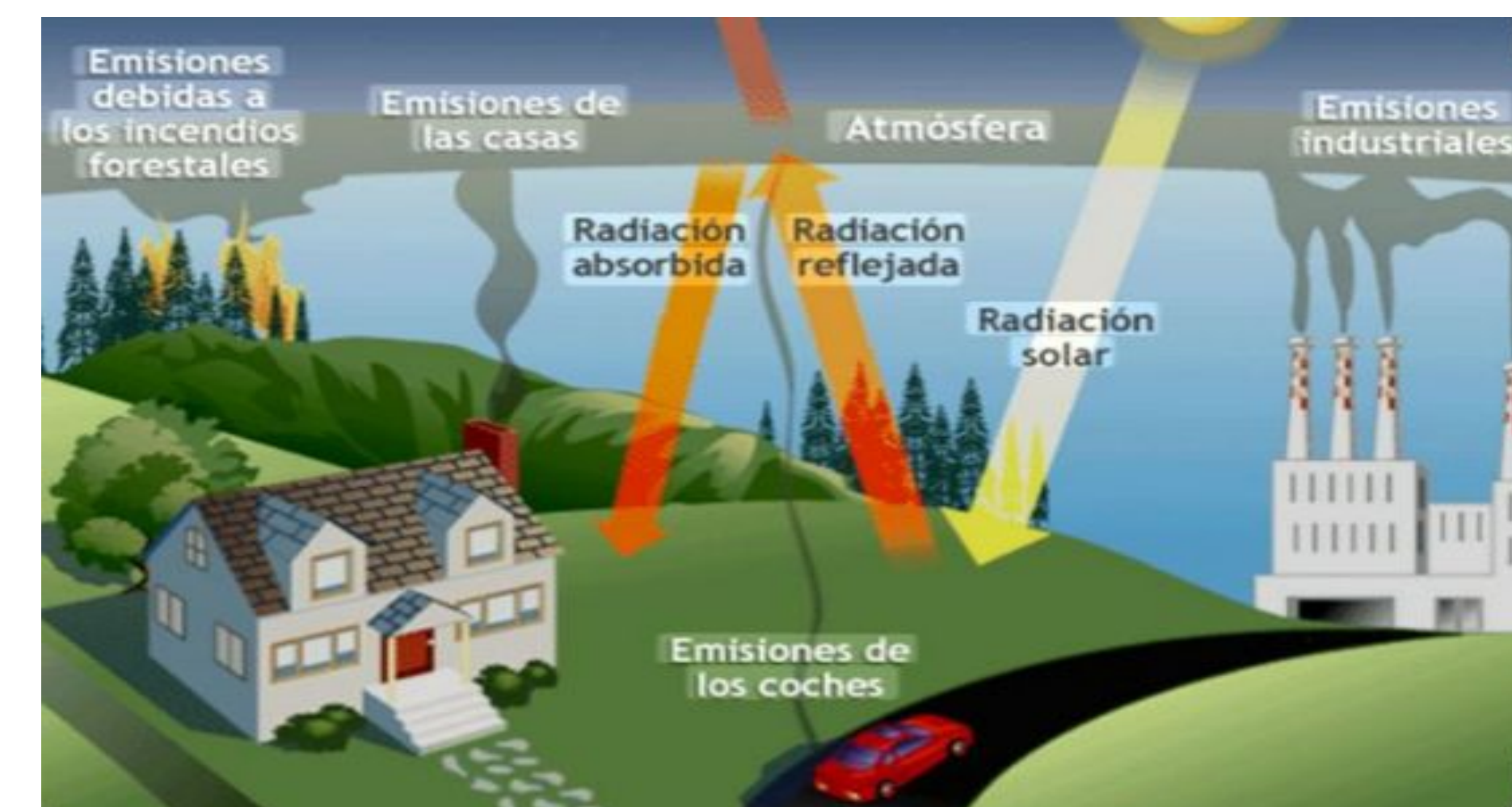
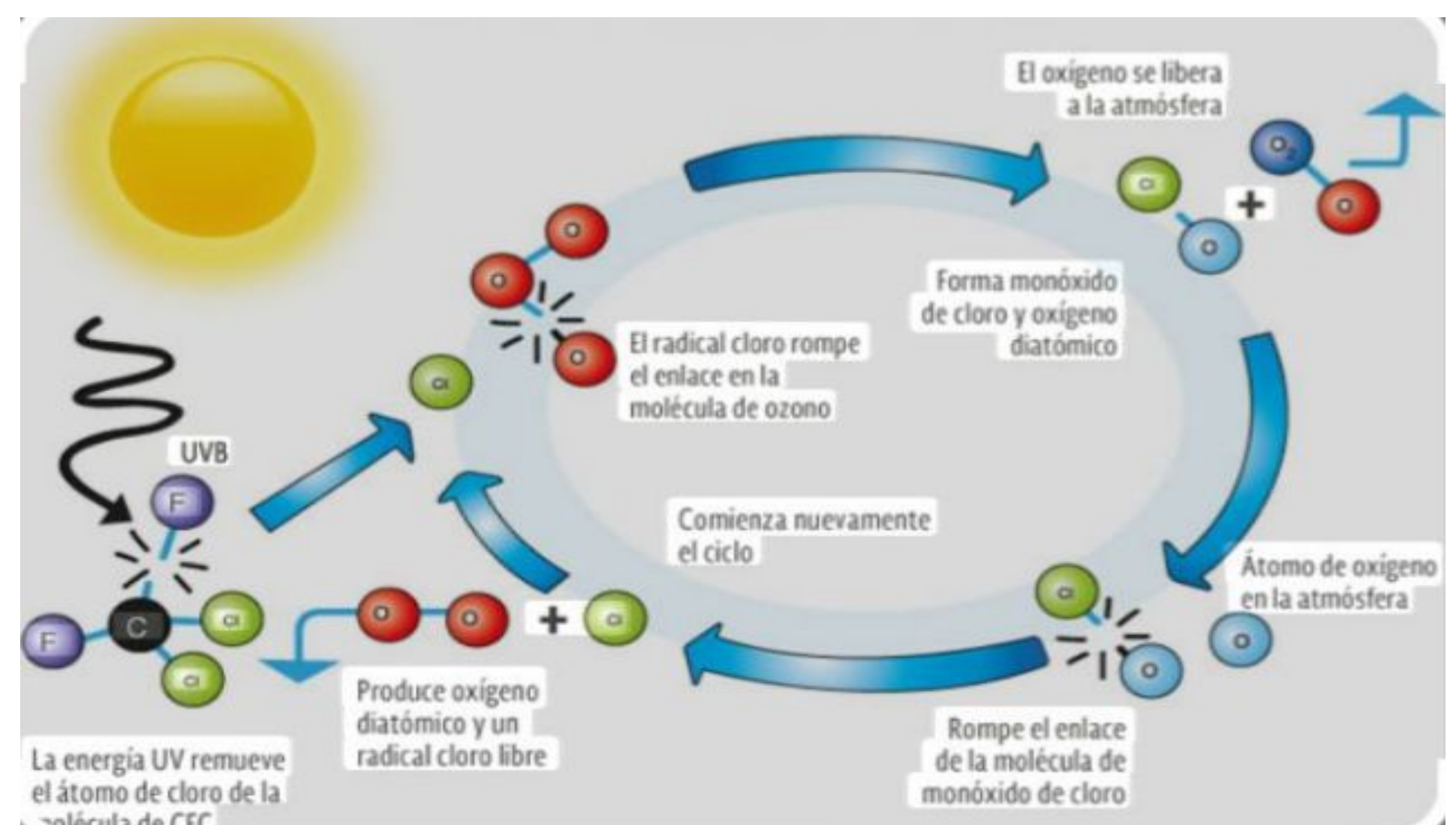
Este destaca que la quema de combustibles fósiles es la principal causa del incremento de gases contaminantes, donde los más relevantes son el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno, las partículas, los metales pesados y el CO_2 ; así mismo estos gases contribuyen al cambio climático, la lluvia ácida y el smog fotoquímico, afectando tanto al medio ambiente como la salud humana. También nos indica 10 tratamientos de procesos industriales como lo son: desulfuración de gases de combustión, captura de mercurio, captura de carbono, reducción catalítica selectiva, precipitadores electrostáticos, técnicas de absorción, depuración húmeda, tecnologías de membranas y plasma no térmico.



- **Emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2 , N_2O) procedentes de los suelos : una revisión.**

Este artículo explica el contexto global sobre el cambio climático destacando el aumento de gases como CO_2 , CH_4 y NO_2 , además aborda cómo la actividad humana, como el uso de combustibles fósiles, la deforestación y la expansión agrícola han alterado los ciclos del carbono y el nitrógeno haciendo mayor impacto en la agricultura centrándose en agroecosistemas de Chile y similares alrededor del mundo, además se discuten medidas para minimizar estas emisiones.

Por otro lado, un mayor conocimiento sobre los procesos biológicos que promueven las emisiones de gases de efecto invernadero, permitirá la creación de oportunidades para el desarrollo agrícola en condiciones ambientales donde el suelo pueda actuar como un reservorio o emisor de GHG dependiendo del balance de entradas y salidas.



- **Rutas de degradación del bisfenol a BPA durante la reacción del ozono**

Este documento aborda la degradación del bisfenol, el cual es un compuesto disruptor endocrino de alto impacto ambiental y sanitario, donde este proceso busca identificar los productos intermedios y finales del proceso de oxidación y proponer una ruta de degradación de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. Este artículo estipula que el BPA es un disruptor ampliamente utilizado en la fabricación de plásticos (polycarbonatos y resinas). Su producción mundial supera los 2.5 millones de toneladas anuales con unas 100 toneladas liberadas al ambiente cada año, esta posee alta estabilidad química y resistencia biológica, lo cual dificulta su eliminación por métodos convencionales, además se han detectado rastros de BPA en sangre humana y cuerpos de agua representando un riesgo de exposición crónica. Este documento revisa estudios previos que usaron ozono y radicales hidroxilo para degradar el BPA señalando que a $\text{pH} < 7$, predomina la oxidación molecular directa del ozono y a $\text{pH} > 7$, ocurre principalmente la vía radicalaria, lo cual indica que ambos mecanismos pueden coexistir cerca de $\text{pH} 7$.

- **Conclusión**

Los tres estudios analizados comparten un propósito común: proteger el medio ambiente mediante la aplicación del conocimiento científico y tecnológico para **reducir** contaminantes derivados de la actividad humana. El primer documento destaca la importancia del suelo y la agricultura en la generación de gases de efecto invernadero como CO_2 y N_2O , señalando la necesidad de **manejos sostenibles** que reduzcan las emisiones y conserven la materia orgánica. El segundo artículo se enfoca en las **tecnologías industriales** para el **tratamiento y separación de gases contaminantes**, mostrando los avances en **procesos** catalíticos, adsorción, membranas y captura de carbono, esenciales para disminuir la huella ambiental de las industrias. El tercero demuestra cómo la **ozonización y el análisis instrumental (GC-MS)** pueden aplicarse eficazmente para la degradación de contaminantes emergentes como el bisfenol A, protegiendo la salud pública.

- **Revisión bibliográfica**

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323997140000054?via%3Dihub>
- https://www.cdhfinechemical.com/images/product/msds/37_2113175157_BisphenolA-CASNO-80-05-7-
- <https://research.ebsco.com/c/cl5jon/viewer/pdf/nxvamzs5ob>

ARQUITECTURA E INGENIERÍA

Avances en biotecnología ambiental: innovación en el control biológico de emisiones gaseosas.

Sara Isabel Jaramillo Madrid- Leidy Daniela Barbosa Montoya

Química II

Ingeniería Ambiental.

Profesor: Carlos Fidel Granda Ramírez

El crecimiento de las actividades industriales ha generado un aumento en la emisión de gases contaminantes, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles para su tratamiento. Entre ellas, las tecnologías biológicas se destacan por utilizar microorganismos capaces de degradar compuestos tóxicos del aire de forma natural, económica y respetuosa con el ambiente. Los tres artículos analizados evidencian esta evolución tecnológica: desde la biofiltración, que emplea materiales orgánicos como soporte microbiano, hasta los biorreactores de membrana, que mejoran el control del proceso y permiten eliminar compuestos más complejos. En conjunto, muestran el avance de la biotecnología ambiental hacia métodos más eficientes, controlados y sostenibles para la purificación del aire.

❖ Tratamiento de gases residuales en biofiltros.

Este estudio analiza el uso de biofiltros para eliminar gases contaminantes, específicamente la trietilamina (TEA), un compuesto orgánico presente en emisiones industriales. El sistema experimental utilizó una mezcla de compost y cáscara de arroz como medio filtrante, donde microorganismos degradaban los contaminantes. Los resultados mostraron altas eficiencias de eliminación (hasta $140 \text{ g/m}^3\cdot\text{h}$), aunque estas disminuían cuando la concentración o velocidad del gas aumentaban. Se desarrolló un modelo matemático que permitió predecir el comportamiento del biofiltro, considerando la inhibición del sustrato.

Este artículo demuestra que la biofiltración es un método económico, ecológico y eficaz para gases con bajas concentraciones de contaminantes, pero evidencia limitaciones en el control de humedad, pH y estabilidad del sistema, lo que dio origen a nuevas tecnologías más avanzadas.

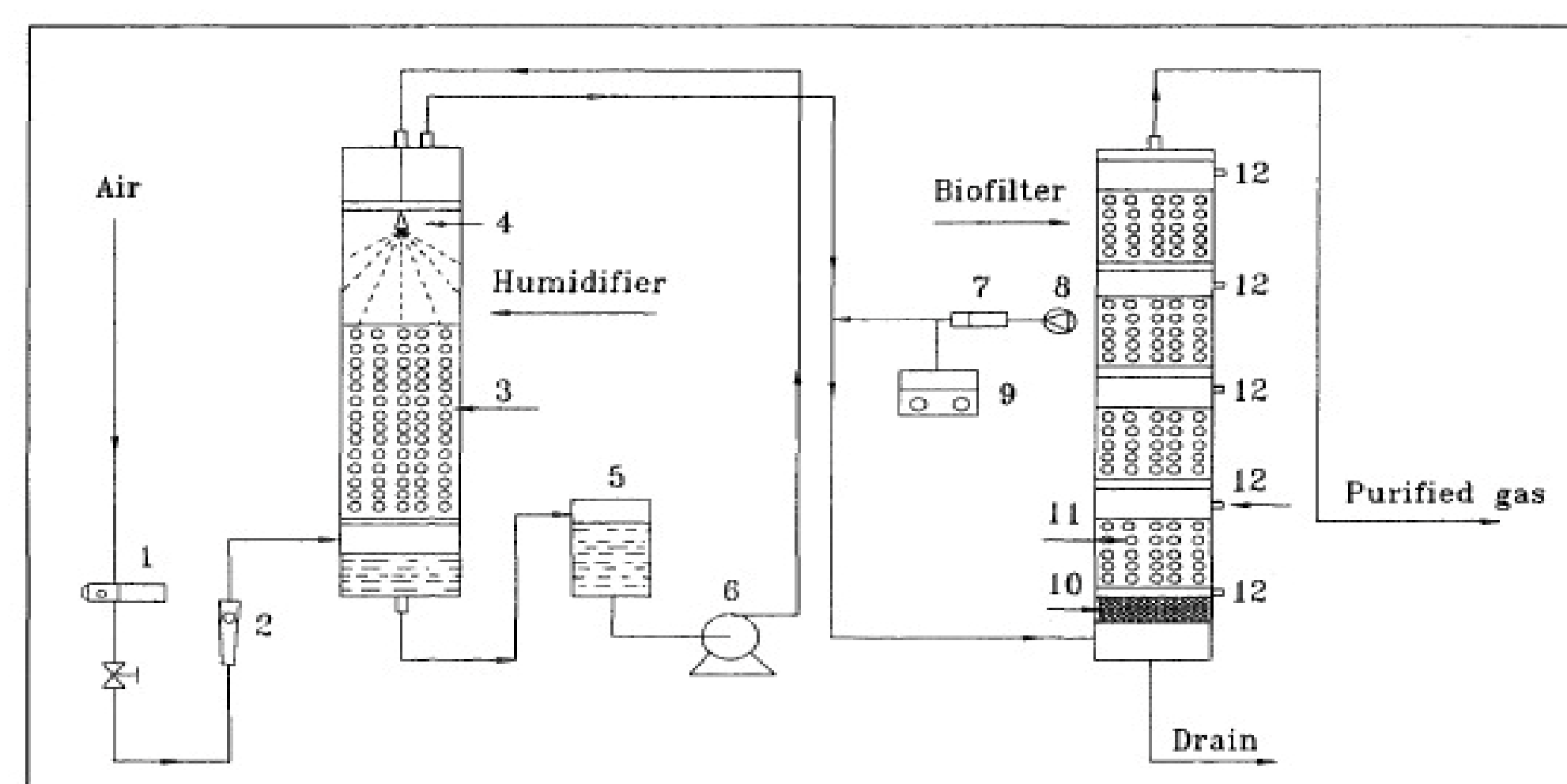


Figure 1. Schematic diagram of the laboratory-scale biofilter unit: 1. air filter; 2. rotameter; 3. pall-ring packings; 4. nozzle; 5. water reservoir; 6. pump; 7. gas-tight syringe; 8. syringe pump; 9. temperature controller; 10. glass beads; 11. filter material; 12. sampling ports.

❖ Biorreactor de membrana para el tratamiento de gases residuales.

Esta investigación doctoral presenta una innovación en la depuración biológica de gases: los biorreactores de membrana (MBR). En este sistema, una membrana hidrofóbica microporos separa la fase gaseosa de la líquida, permitiendo que los contaminantes atraviesen la membrana por difusión para ser degradados por microorganismos en condiciones controladas. El trabajo demostró que este tipo de reactor mejora la transferencia de masa, permite mantener la humedad y nutrientes estables, y facilita la eliminación de compuestos poco solubles o clorados, como el propeno y el tricloroetileno (TCE). Este estudio representa el paso siguiente a la biofiltración, solucionando muchos de sus inconvenientes, como la deshidratación y la acumulación de productos tóxicos. Su aporte principal fue combinar los principios de la biofiltración tradicional con la tecnología de membranas, dando origen a una nueva generación de sistemas biológicos para el tratamiento del aire.

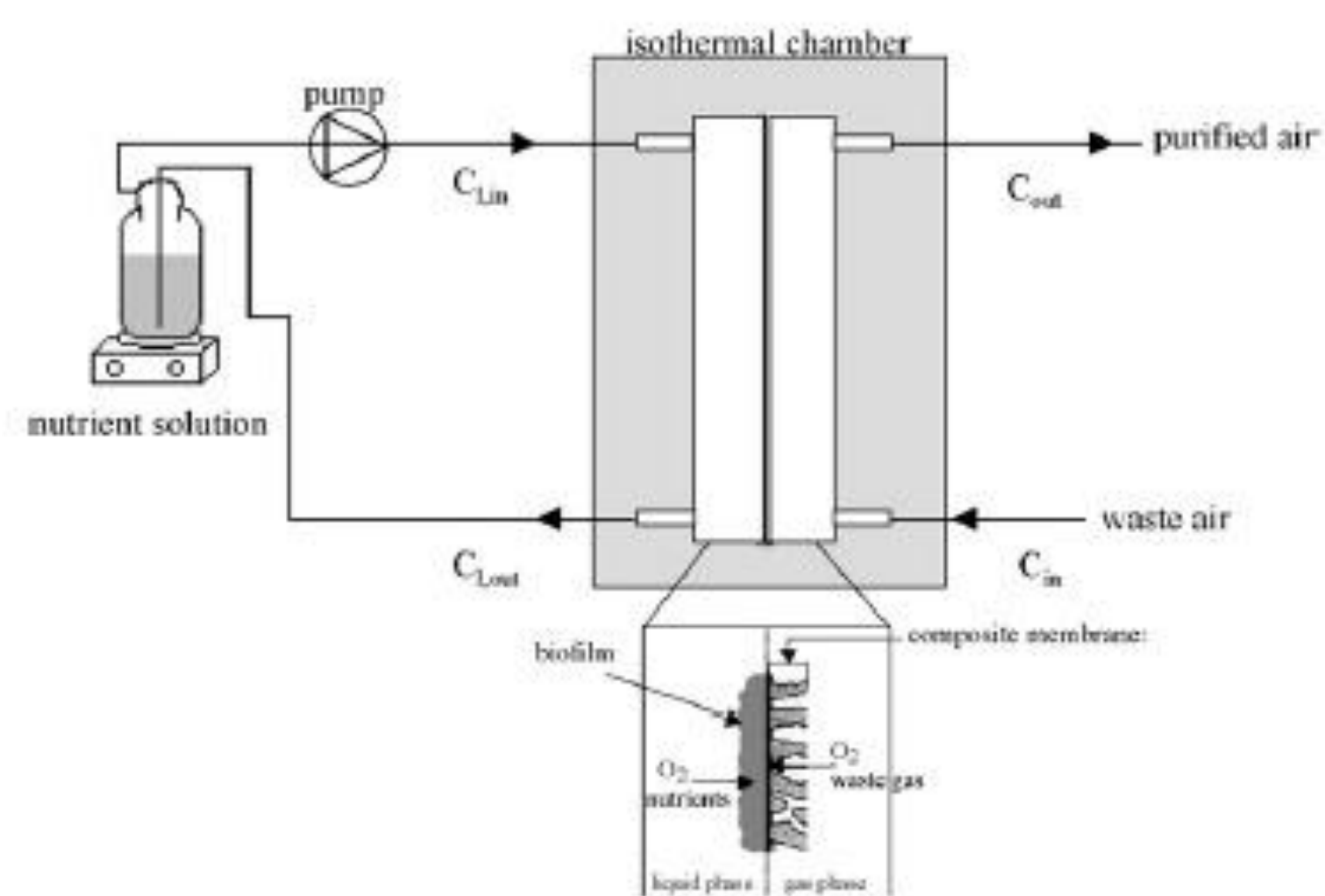


Fig. 1. Membrane bioreactor for removal of waste gas [2]. C_{in} is the compound's concentration to be treated (g m^{-3}), C_{out} the purified air (g m^{-3}), and C_{Lin} and C_{Lout} are the concentration of nutrients inlet and outlet respectively.

❖ Tratamiento biológico de gases residuales basado en membranas.

Este artículo ofrece una revisión científica actualizada sobre los avances en el uso de biorreactores de membrana para el tratamiento de gases residuales. Explica los diferentes tipos de membranas utilizadas (micro porosas, densas, porosas y compuestas) y los mecanismos de transporte de contaminantes a través de ellas.

Los autores destacan que los MBR combinan la separación selectiva de contaminantes con su biodegradación, lo que permite tratar gases con compuestos volátiles de baja solubilidad y alta toxicidad. Sin embargo, advierten que, aunque los resultados en laboratorio son prometedores, todavía se requiere mejorar la estabilidad a largo plazo y reducir los costos de operación para su aplicación industrial.

Este trabajo complementa el de Reij (1997) al consolidar científicamente los fundamentos de esta tecnología y proyectarla como una solución sostenible para la descontaminación del aire.

Referencias:

- Tang, H.-M., Hwang, S.-J., & Hwang, S.-C. (1996). Waste gas treatment in biofilters. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 46(4), 327–334. <https://doi.org/10.1080/10473289.1996.10467466>
- Reij, M. W. (1997). Membrane bioreactor for waste gas treatment [Tesis doctoral, Wageningen Agricultural University]. Wageningen University & Research Repository. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/198429>
- Kumar, A., Dewulf, J., & Van Langenhove, H. (2007). Membrane-based biological waste gas treatment. *Chemical Engineering Journal*, 136(2–3), 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.03.007>

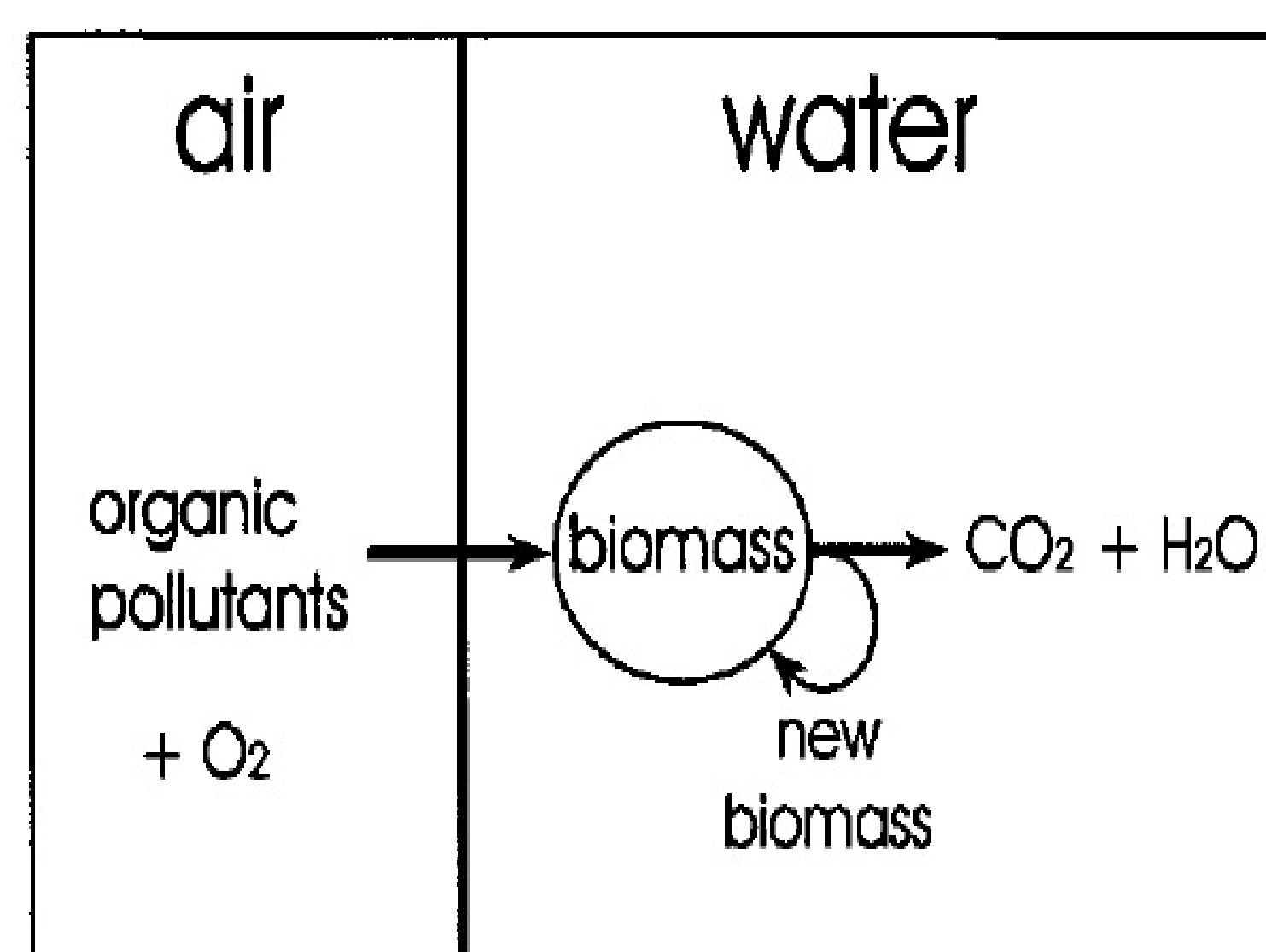


Figure 1. Biological oxidation of gaseous organics.



Análisis Integrado de Tecnologías Limpias para la Reducción de Contaminantes Atmosféricos y Carbono Industrial

Integrantes: Laura Sofía Sotelo Maya – Santiago Rodriguez Agudelo

Las emisiones generadas por la ganadería, la industria farmacéutica y el tratamiento de aguas residuales representan una fuente importante de contaminación y gases de efecto invernadero. Frente a este desafío, surgen tecnologías limpias como la fotocatalisis UV, el análisis de ciclo de vida (LCA) y los sistemas naturales de depuración, que permiten reducir impactos ambientales, optimizar recursos y avanzar hacia una producción más sostenible y baja en carbono.

1. Tratamiento de Emisiones Ganaderas mediante Luz Ultravioleta (UV): Una Revisión de Tecnologías Limpias y Eficientes.

La luz ultravioleta (UV) se presenta como una alternativa innovadora para controlar estas emisiones y desinfectar los residuos sin uso de químicos.

- La tecnología UV-A basada en fotocatalisis con dióxido de titanio (TiO_2) degrada gases y microorganismos por acción de radicales libres ($\text{OH}^\bullet$, $\text{O}_2^\bullet$).
- En ensayos, la eliminación alcanzó tasas del 80–100% para VOCs y bacterias, y reducciones de 3–18% para NH_3 , N_2O y CO_2 .
- Es una tecnología no invasiva, escalable y sostenible, útil en establos, sistemas de ventilación y estanques de estiércol.

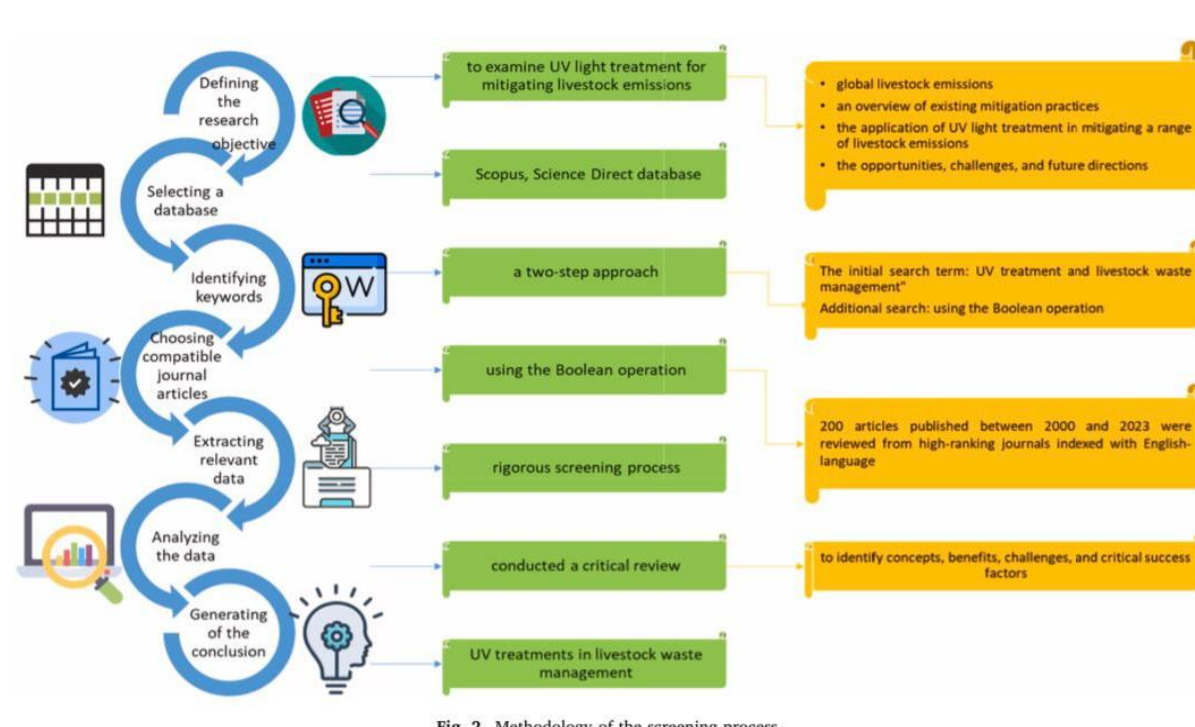


Fig. 2. Methodology of the screening process.

2. Evaluación del Tratamiento de Gases Residuales en la Industria Farmacéutica: Gestión Conjunta de Carbono y Contaminantes mediante Análisis de Ciclo de Vida (LCA)

La industria farmacéutica china, altamente intensiva en recursos y energía, produce grandes cantidades de gases contaminantes (VOCs, HCl, NH_3) que contribuyen al cambio climático.

- Se aplicó la metodología Life Cycle Assessment (LCA) a una planta farmacéutica en Tianjin, evaluando etapas desde almacenamiento hasta síntesis química.
- Los impactos más críticos fueron el potencial de calentamiento global (GWP) y la acidificación (AP), representando más del 85% del total.
- La etapa de síntesis química generó más del 80% de las cargas ambientales.
- Las mejoras tecnológicas en el tratamiento de gases redujeron entre 80–90% del impacto ambiental total.



3. Evaluación Ambiental y Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales

El tratamiento de aguas residuales es esencial para proteger los ecosistemas acuáticos, pero también genera impactos ambientales y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Este estudio compara diferentes sistemas de tratamiento para identificar el más sostenible.

Se evaluaron tres tecnologías de igual capacidad:

1. Lodos activados (AS)
2. Humedal construido (CW)
3. Estanque algal de alta tasa (HRAP)

- Usando SimaPro 9 y el método ReCiPe 2016, se midieron impactos en salud humana, ecosistemas y recursos.
- Los materiales de construcción (cemento y acero) son responsables del mayor impacto en plantas pequeñas.
- Los sistemas naturales demostraron menor huella de carbono y menor uso de recursos.

CONCLUSIONES

- ✓ En conjunto, las investigaciones demuestran que la integración de estrategias tecnológicas y de gestión ambiental puede disminuir hasta un 90 % las cargas contaminantes y contribuir significativamente al cumplimiento de los objetivos globales de neutralidad de carbono y sostenibilidad.
- ✓ Los tres estudios analizados evidencian el papel crucial de la innovación tecnológica en la mitigación de contaminantes gaseosos y en la transición hacia modelos productivos más sostenibles.
- ✓ Tanto en la ganadería, la industria farmacéutica como en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, las tecnologías limpias (fotocatalisis UV, análisis de ciclo de vida y sistemas naturales) demuestran ser herramientas efectivas para reducir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y mejorar la calidad ambiental.

Referencias

- Nguyen, T. K. L., Ngo, H. H., Guo, W., Nghiem, L. D., Qian, G., Liu, Q., Liu, J., Chen, Z., Bui, X. T., & Mainali, B. (2021). Assessing the environmental impacts and greenhouse gas emissions from the common municipal wastewater treatment systems. *Science of the Total Environment*, 801, Article 149676. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149676>
- Zhang, Y., Wang, Y., Zhang, J., Liu, J., Ruan, J., Jin, X., Liu, D., Lu, Z., & Xu, Z. (2024). Research on waste gas treatment technology and comprehensive environmental performance evaluation for collaborative management of pollution and carbon in China's pharmaceutical industry based on life cycle assessment (LCA). *Science of the Total Environment*, 919, Article 170555. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170555>
- Perera, T. (2024). A review on ultraviolet light treatment for emissions of livestock gases, odor control in waste management, and disinfection of common environmental pathogens. *Waste Management Bulletin*, 2(4), 167-183. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.11.001>

XXIII SEMANA DE LA FACULTAD

ARQUITECTURA E INGENIERÍA

“Procesos de tratamiento de gases contaminantes: enfoques físico-químicos y biotecnológicos para la reducción de emisiones”

• Introducción

Las emisiones de gases contaminantes como CO_2 , CH_4 y NO_x contribuyen al efecto invernadero y al deterioro ambiental. Desde la química, se han desarrollado procesos físicos, químicos y biológicos para su control y tratamiento. Estos métodos permiten transformar o reducir los gases emitidos por fuentes industriales, de biomasa y ganaderas. El presente trabajo reúne tres estudios que muestran cómo la química ofrece soluciones sostenibles para mitigar las emisiones y mejorar la calidad del aire.

• Objetivo

Analizar y comparar distintos métodos de tratamiento de gases contaminantes descritos en tres artículos científicos, destacando los procesos **químicos y biológicos** que contribuyen a la **reducción de emisiones y mejora de la calidad del aire**.

• Metodología

- Se seleccionaron tres artículos científicos recientes sobre el tratamiento de gases contaminantes.
- Se analizaron según:
 - Fuente de emisión.
 - Tipo de gas tratado.
 - Método aplicado (químico, físico o biológico).
 - Resultados obtenidos.
- Se compararon los enfoques para identificar similitudes y diferencias entre las estrategias empleadas.

1. Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants: Minimization, Treatment and Prevention” (Campos et al., 2016)

This study analyzes greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants and proposes operational and chemical strategies to minimize CO_2 , CH_4 , and N_2O generation.

El artículo examina cómo los procesos biológicos y químicos en las plantas de tratamiento de aguas pueden optimizarse para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Los autores destacan que la mejora en la aireación y la digestión anaerobia permite disminuir significativamente el CO_2 , CH_4 y N_2O , aumentando la eficiencia ambiental de los sistemas de tratamiento.

2. “Process Configurations for Emission Control: CESAR1 Emission Behavior in Biomass Combustion Gas Treatment” (Dimitriadi et al., 2025)

This research evaluates how different process configurations using CESAR1 solvent reduce amine and NO_x emissions during biomass combustion gas treatment.

El estudio analiza distintas configuraciones de proceso para controlar las emisiones gaseosas en plantas de biomasa. Mediante lavado ácido, control térmico y filtración química, se logró reducir más del 90 % de las emisiones de aminas y óxidos de nitrógeno. El trabajo demuestra la eficacia de las reacciones ácido-base y la adsorción como métodos químicos para el tratamiento de gases industriales.

3. “Novel Biological Approach to Mitigate Methane Emissions from Livestock Slurry through Microbial Conversion of Glycerol” (Ambrose et al., 2025)

This paper presents a biological method that uses microbial glycerol conversion to reduce methane emissions from livestock waste by up to 95%.

El artículo propone un enfoque biotecnológico para disminuir las emisiones de metano en los purines ganaderos. Utiliza microorganismos del género *Limosilactobacillus reuteri* que convierten el glicerol en compuestos menos contaminantes. Los resultados evidencian una reducción cercana al 95 % del CH_4 , resaltando el potencial de la química verde para mitigar los efectos de la contaminación atmosférica.



• Conclusiones

- Los procesos químicos son fundamentales para el **control y reducción de emisiones gaseosas**.
- El **lavado ácido**, la **oxidación** y la **adsorción** son métodos efectivos para eliminar contaminantes gaseosos en la industria.
- Los **procesos biológicos**, como la conversión microbiana, ofrecen alternativas sostenibles y de bajo costo.
- La combinación de enfoques **químicos, biotecnológicos y operativos** representa el camino hacia un tratamiento integral de gases contaminantes.

Autores:

Ana María Cespedes - Luisa Arango Pamplona

Asignatura:

Química II

DEL 6 AL 10 DE MAYO



INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA
COLEGIO MAYOR
DE ANTIOQUIA®

Acreditados
en ALTA CALIDAD



Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación



XXVI SEMANA DE LA FACULTAD

ARQUITECTURA E INGENIERÍA

Optimización de Procesos en el Tratamiento de Gases Industriales

María José Arroyave, Diana Chavarría, Evelyn Pulgarín.

Química II

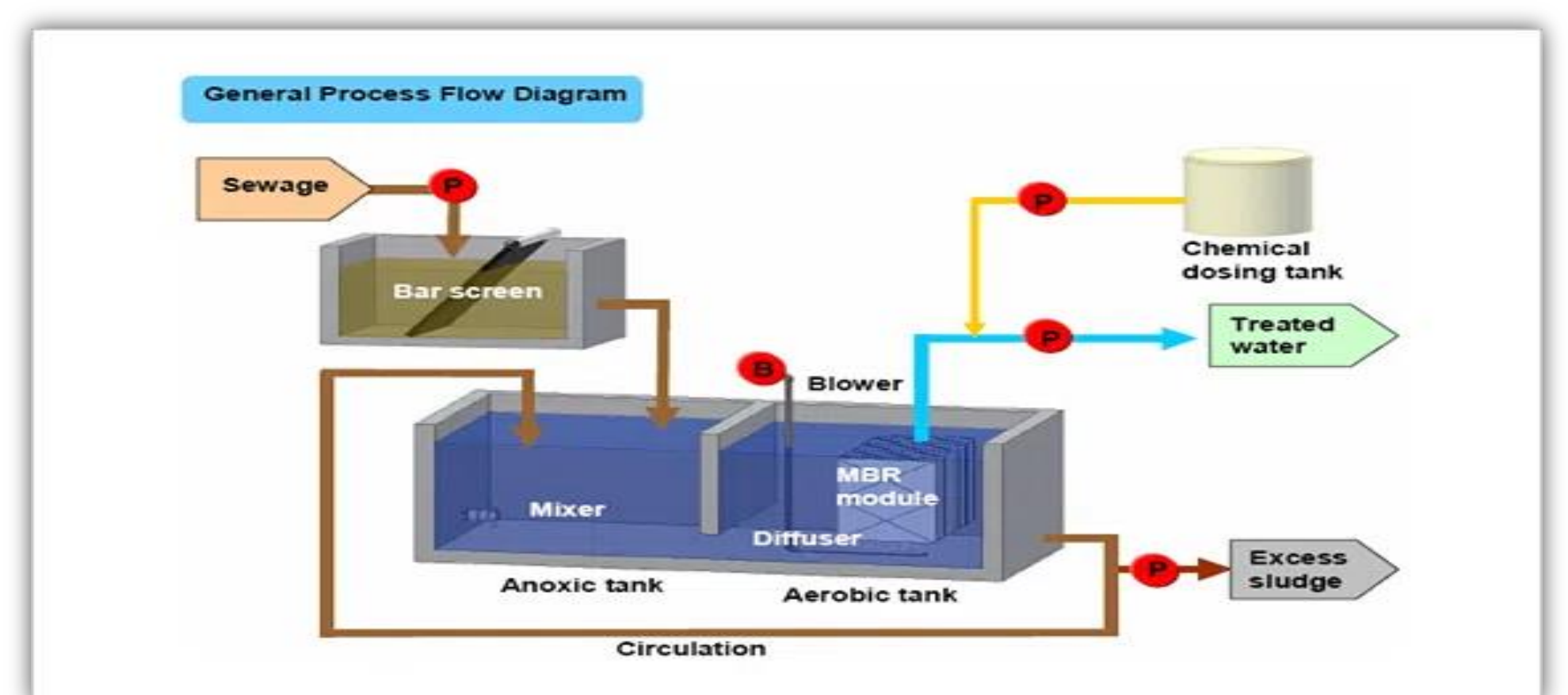
Ingeniería Ambiental

Profesor: Carlos Fidel Granda Ramírez

El tratamiento de gases es un proceso esencial en diversas industrias para acondicionar, purificar o separar componentes de mezclas gaseosas. Su aplicación permite eliminar impurezas, ajustar composiciones específicas, recuperar compuestos valiosos y cumplir con estándares ambientales y de calidad. Dependiendo del tipo de gas y su uso final, se emplean tecnologías como compresión, enfriamiento, absorción, adsorción, membranas, y procesos criogénicos. Estas operaciones contribuyen a mejorar la eficiencia energética, reducir emisiones contaminantes y optimizar el desempeño de sistemas industriales y energéticos.

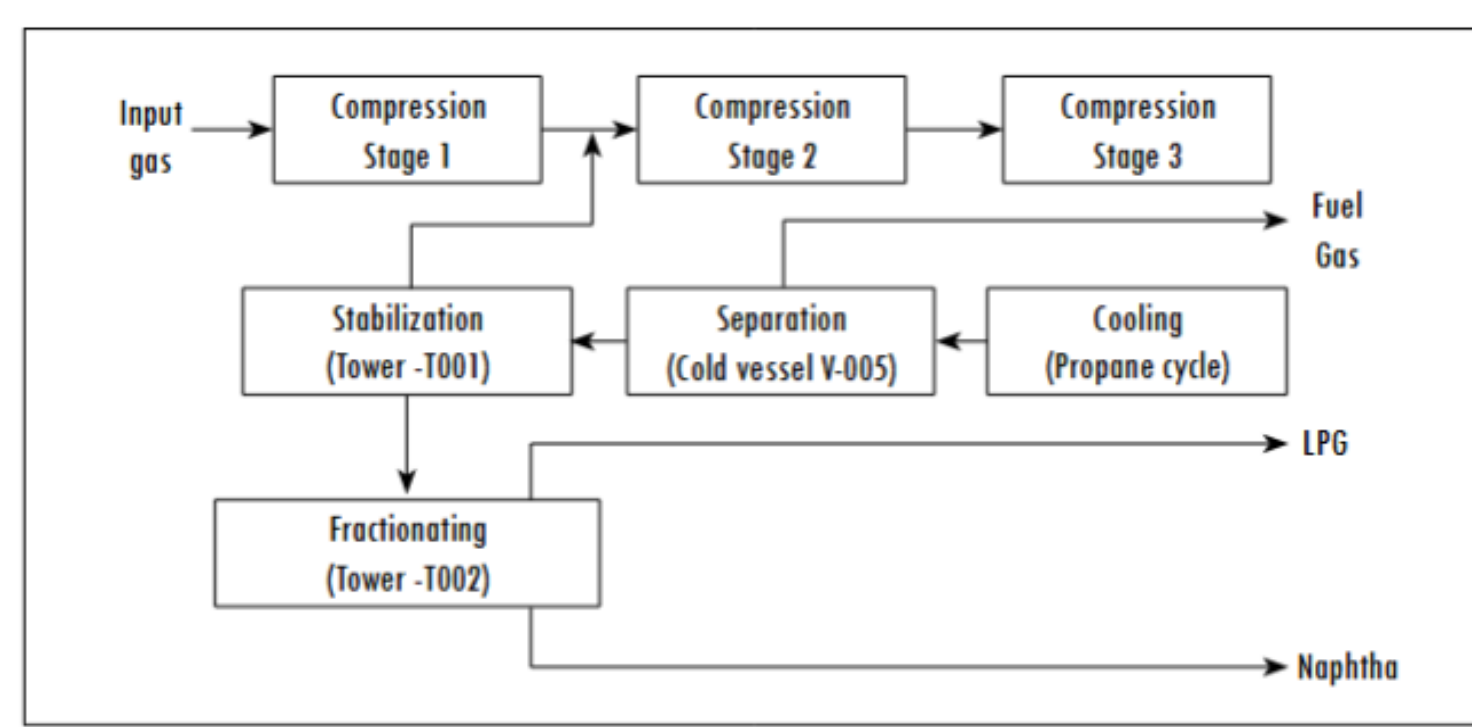
❖ Biorreactores de membrana para el tratamiento de gases residuales

El artículo presenta una revisión sobre el uso de biorreactores de membrana para purificar gases contaminados, donde los compuestos pasan a través de una membrana y son degradados biológicamente. Destaca su alta eficiencia y control frente a métodos tradicionales, aunque señala limitaciones como la acumulación de biomasa, el costo elevado y la falta de estudios a gran escala. Los autores concluyen que estos sistemas son prometedores para eliminar contaminantes poco solubles y compuestos clorados.



Rachna. (2024, noviembre 21). Tecnología de biorreactor de membrana (MBR). Sigma Earth. <https://sigmaearth.com/es/Tecnolog%C3%ADa-de-biorreactor-de-membrana-MBR/>

Figure 2. Block diagram of the analyzed gas plant



• Mesa Gómez, Adriana, Valero Valdivieso, Manuel y Figueredo Medina, Manuel. (2016). Mejoras basadas en simulación de procesos para maximizar la producción de nafta en una planta de procesamiento de gas existente. Ingeniería y Universidad , 20 (2), 355-371. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu20-2.psim>

❖ Mejoras basadas en la simulación de procesos para maximizar la producción de nafta en una planta de procesamiento de gas existente.

El estudio busca mejorar la eficiencia y aumentar la producción de nafta en una planta de procesamiento de gas natural mediante simulación de procesos con Aspen HYSYS®. Se analizaron las etapas de compresión, enfriamiento y separación, aplicando análisis de sensibilidad para identificar parámetros óptimos.

Las mejoras propuestas incluyeron el uso de un separador trifásico, la activación del enfriador de aire y la modificación de la torre de fraccionamiento, lo que permitió elevar la recuperación de nafta del 82.79% al 99.13% y mejorar su calidad en un 20.85%. El trabajo demuestra que la simulación de procesos es una herramienta clave para optimizar operaciones industriales, aumentar la rentabilidad y mejorar la eficiencia sin detener la planta.

❖ Sistema para Cuantificar Emisiones de Metano, Dióxido de Carbono y Sulfuro de Hidrógeno en Biodigestores de Bajo Costo Inoculados con Estiércol de Caballo

El estudio evaluó las emisiones de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S) generadas por estiércol de caballo en biodigestores de bajo costo en el Cantón de Caballería (Bogotá). Se monitorearon tres escenarios durante 45 días: almacenamiento de estiércol, salida del biodigestor y condiciones de laboratorio. Las mayores emisiones se registraron en el almacenamiento, influenciadas por la temperatura, mientras que el biodigestor mostró reducciones significativas de GEI. En laboratorio, las concentraciones fueron más altas por el ambiente cerrado. El análisis fisicoquímico evidenció una disminución del 84 % en DQO y 95 % en sólidos volátiles, confirmando una degradación eficiente. En general, el biodigestor redujo CH_4 entre 8–87 %, CO_2 entre 58–67 % y H_2S entre 33–65 %, demostrando su eficacia en la mitigación de emisiones.



Acuña Monsalve, Y., Mecón Rodríguez, L. S., & Molina, D. (2024). System for quantifying methane, carbon dioxide, and hydrogen sulfide emissions in low-cost digesters inoculated with horse manure. Revista ION Investigación Optimización y Nuevos procesos en Ingeniería, 37(2). <https://doi.org/10.18273/revion.v37n2-2024003>

En conjunto, los tres estudios destacan el papel clave de la biotecnología y la optimización de procesos para mejorar la sostenibilidad ambiental y la eficiencia energética. El sistema de biodigestores con estiércol de caballo demuestra una alternativa viable para reducir emisiones de gases de efecto invernadero, mientras que la simulación y optimización de plantas de gas permiten maximizar la producción de combustibles con mayor rendimiento. Por su parte, los biorreactores de membrana representan una tecnología prometedora para el tratamiento de gases contaminantes, combinando eficiencia biológica y control operativo. En conjunto, estas investigaciones contribuyen al desarrollo de soluciones más limpias, eficientes y sostenibles para la gestión energética y ambiental.

Referencias:

- Reij, M. W., Keurentjes, J. T. F., & Hartmans, S. (1998). Membrane bioreactors for waste gas treatment. Journal of Biotechnology, 59(3), 155–167. [https://doi.org/10.1016/s0168-1656\(97\)00169-7](https://doi.org/10.1016/s0168-1656(97)00169-7)
- Mesa Gómez, Adriana, Valero Valdivieso, Manuel y Figueredo Medina, Manuel. (2016). Mejoras basadas en simulación de procesos para maximizar la producción de nafta en una planta de procesamiento de gas existente. Ingeniería y Universidad , 20 (2), 355-371. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu20-2.psim>
- Acuña Monsalve, Yuditanduly, Mecón Rodríguez, Laura Sofía y Molina, Daniel. (2024). Sistema para la cuantificación de emisiones de metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno en digestores de bajo costo inoculados con estiércol de caballo. Revista ION , 37 (2), 37-47. Publicado electrónicamente el 8 de agosto de 2024. <https://doi.org/10.18273/revion.v37n2-2024003>



XXVI SEMANA DE LA FACULTAD

ARQUITECTURA E INGENIERÍA

Tecnologías Avanzadas para el Tratamiento de Gases Industriales Contaminantes

Autores: Manuela Betancur, Samuel David Osorio, Yesica Yuleima Nohava

Química II

Ingeniería Ambiental

Docente: Carlos Fidel Granda Ramírez

El tratamiento de gases industriales es una acción esencial para disminuir la contaminación atmosférica y mitigar los efectos del cambio climático. Las emisiones provenientes de procesos productivos contienen compuestos como dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, metano y metales pesados, los cuales afectan la salud humana y el equilibrio ambiental. Frente a esta problemática, la investigación científica ha desarrollado diversas tecnologías que buscan capturar, transformar o eliminar estos contaminantes de manera más eficiente y sostenible. Este trabajo reúne tres enfoques que reflejan esa búsqueda constante por soluciones limpias: el uso del plasma caliente, la oxidación por ozono y los procesos avanzados de separación.

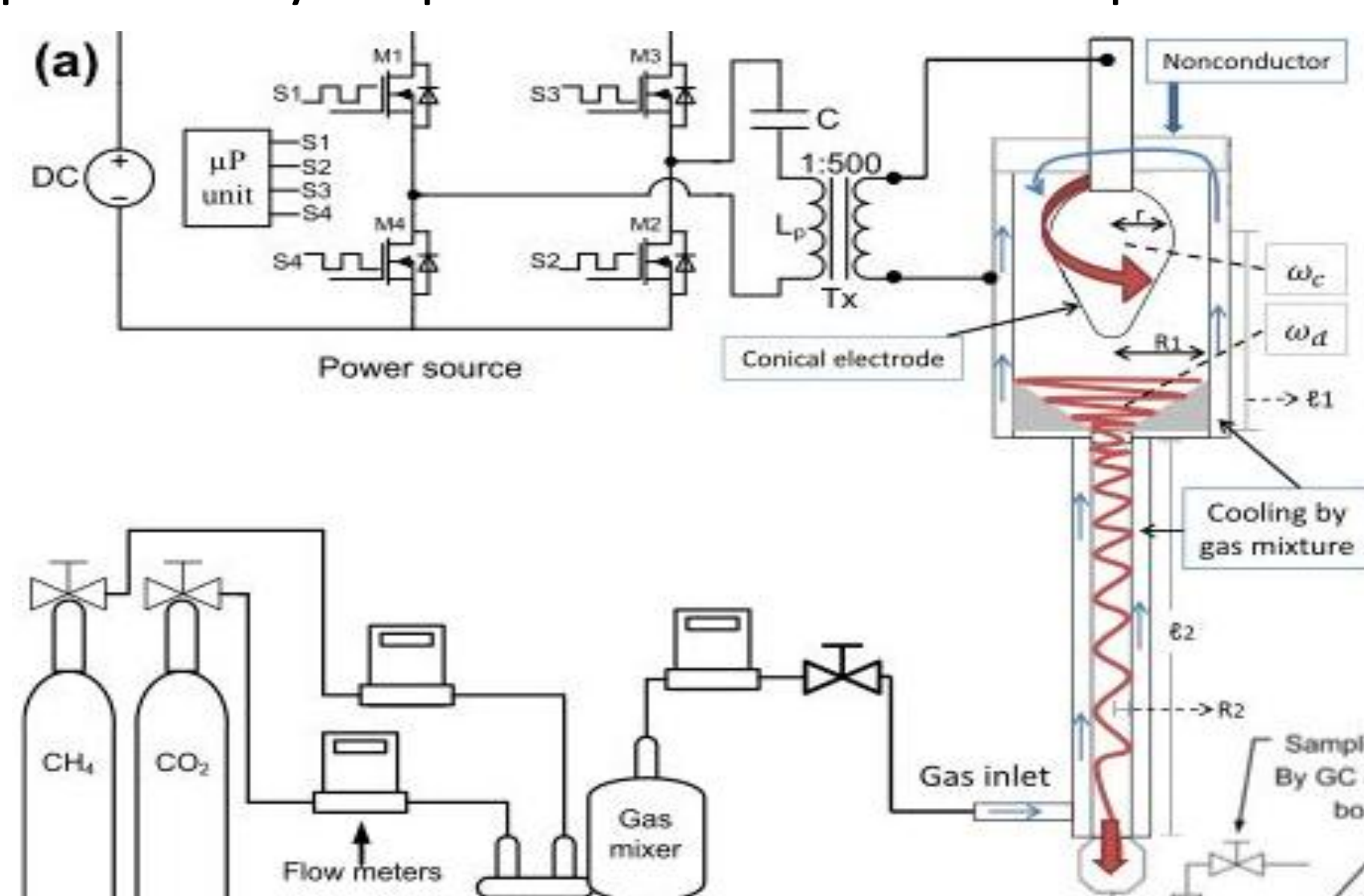


Imagen tomada de: Lin, C. (2024). Review of the use of thermal plasma for greenhouse gas conversion to hydrogen. Elsevier. Disponible en: <https://share.google/gEixc6OliaQoQcc3z>

❖ Revisión del uso de plasma caliente para la conversión de gases de efecto invernadero en hidrógeno

Este artículo presenta el uso de plasma térmico o plasma caliente como una alternativa innovadora para transformar gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), en productos aprovechables como hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO). Mediante descargas eléctricas a temperaturas extremadamente altas, las moléculas de gas se rompen y recombinan, logrando una reducción significativa de emisiones y un aprovechamiento energético sostenible. Este proceso convierte un problema ambiental en una oportunidad tecnológica, al producir combustibles limpios a partir de residuos gaseosos y reducir el impacto climático de la industria. Además, demuestra que la aplicación del plasma puede integrarse en diferentes sistemas productivos, promoviendo la transición hacia fuentes energéticas más limpias y eficientes.

❖ Tratamiento de gases industriales mediante oxidación por ozono

El estudio analiza la aplicación del ozono (O_3) como agente oxidante para eliminar contaminantes presentes en los gases de combustión, como óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2), mercurio (Hg) y compuestos orgánicos volátiles (VOCs). El ozono oxida estas sustancias, transformándolas en compuestos solubles o menos dañinos que luego se eliminan mediante absorción húmeda. Esta tecnología es altamente eficiente a bajas temperaturas, no requiere reactivos peligrosos y reduce más del 90 % de los contaminantes, convirtiéndose en una opción económica, segura y adaptable a sistemas industriales existentes. Además, su implementación contribuye directamente a la mejora de la calidad del aire y al desarrollo de procesos industriales más sostenibles.

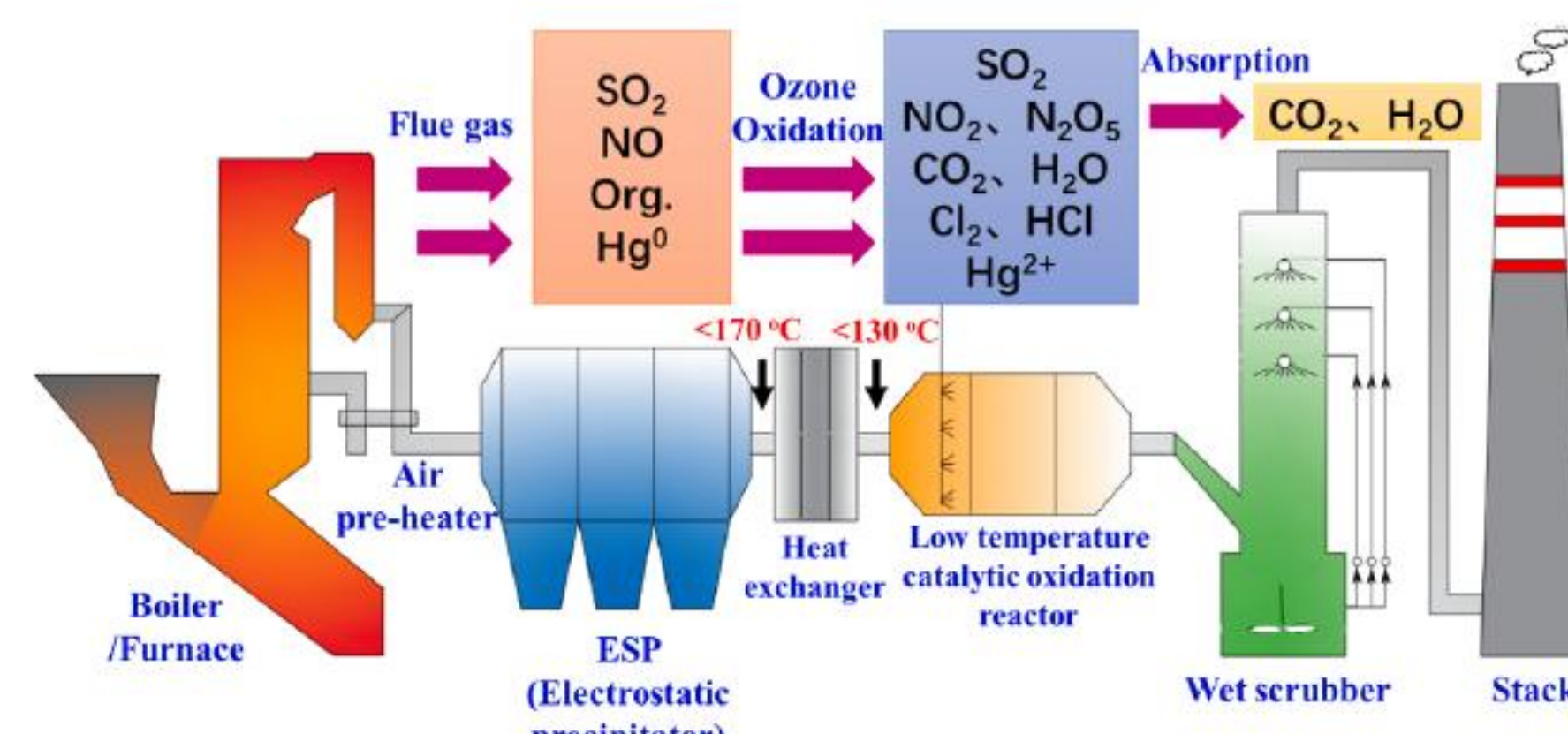


Imagen tomada de: Lin, S., Wang, S., Zhang, W., Guo, Y. & Chen, Y. (2020). Flue gas treatment with ozone oxidation: An overview on NO_x , organic pollutants, and mercury. Chemical Engineering Journal, 382, 123030. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894719324428>

❖ Tecnologías de separación avanzadas para el control de emisiones gaseosas

Este artículo expone los avances en procesos de separación física, química y biológica aplicados al tratamiento de gases industriales contaminantes. Se incluyen métodos como adsorción, filtración con membranas, biofiltración y fotocátalisis, los cuales retienen, transforman o degradan compuestos nocivos antes de su liberación al ambiente. Estas tecnologías destacan por su eficiencia energética, adaptabilidad y bajo impacto ambiental, ofreciendo una herramienta clave para optimizar la sostenibilidad y el control de emisiones en la industria. Su aplicación combinada permite reducir gases de efecto invernadero y partículas tóxicas, lo que mejora significativamente la calidad del aire y la eficiencia de los procesos productivos. Además, promueven el uso responsable de la energía y el desarrollo de una industria moderna comprometida con la protección ambiental y el equilibrio ecológico.

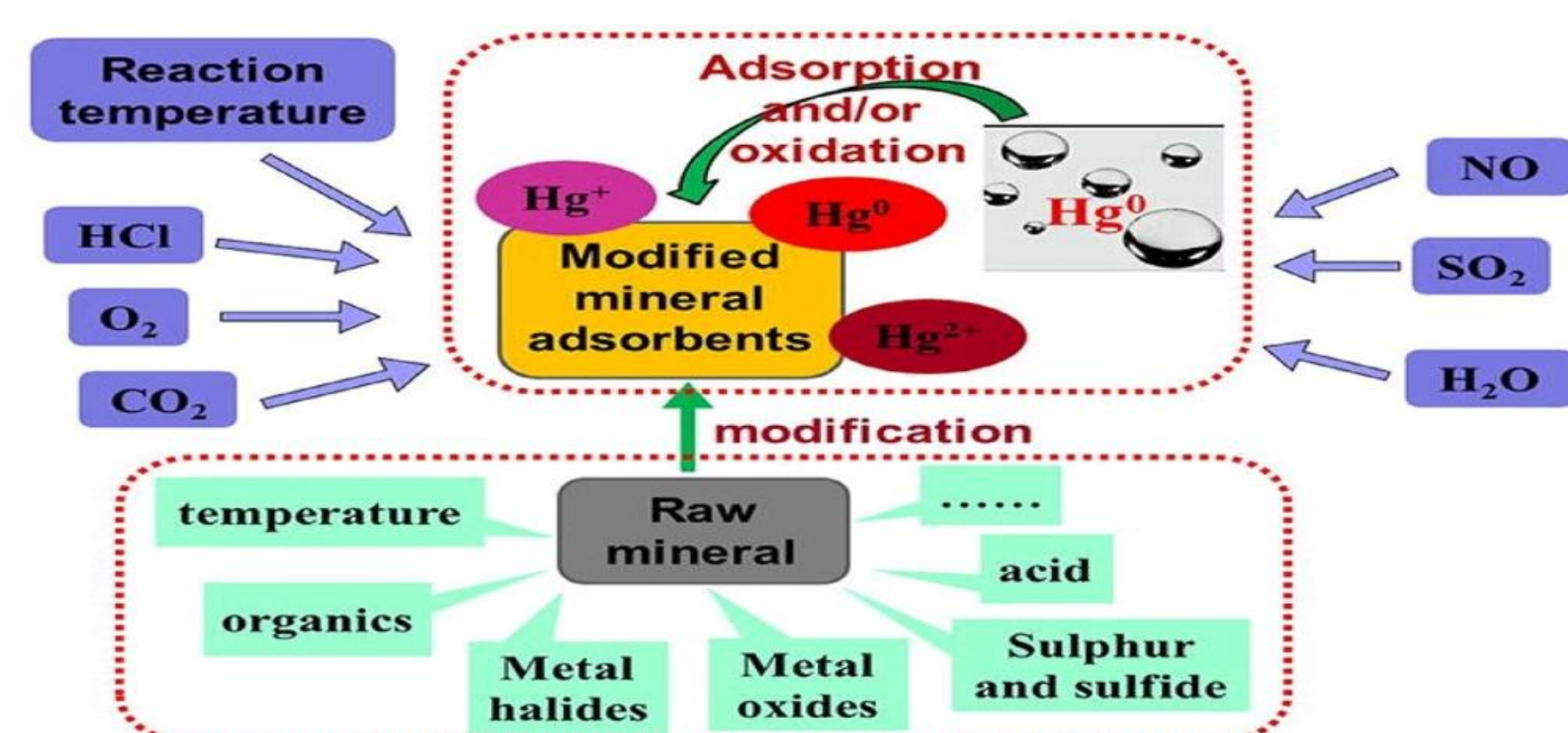


Fig. 2. Mercury Capturing Mechanism [52].

Imagen tomada de: Lin, S., Wang, S., Zhang, W., Guo, Y. & Chen, Y. (2020). Flue gas treatment with ozone oxidation: An overview on NO_x , organic pollutants, and mercury. Chemical Engineering Journal, 382, 123030. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894719324428>

El tratamiento de gases industriales representa un paso fundamental hacia un desarrollo más limpio y responsable. Los tres enfoques estudiados muestran que la ciencia puede convertir la contaminación en oportunidad, utilizando la tecnología para reducir emisiones y aprovechar los recursos de manera más inteligente. A través del plasma caliente, la oxidación por ozono y los procesos de separación, se demuestra que es posible avanzar hacia una industria más eficiente, sostenible y comprometida con el medio ambiente. En conjunto, estas investigaciones inspiran un cambio de perspectiva: cuidar el aire que respiramos también es parte del progreso.

Referencias:

- Lin, C. (2024). Review of the use of thermal plasma for greenhouse gas conversion to hydrogen. Energy Reports, 12(1), 45–67. Elsevier. Disponible en: <https://share.google/gEixc6OliaQoQcc3z>
- Lin, S., Wang, S., Zhang, W., Guo, Y., & Chen, Y. (2020). Flue gas treatment with ozone oxidation: An overview on NO_x , organic pollutants, and mercury. Chemical Engineering Journal, 382, 123030. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894719324428>
- Zhou, H., Li, X., & Wang, J. (2024). Advances in separation technologies for gas emission control. Heliyon, 10(2), e14597. Elsevier. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024084597>



XXVI SEMANA DE LA FACULTAD

ARQUITECTURA E INGENIERÍA

Integrantes: Manuela Munera Quiroz, Michelle Mariana Bravo Velásquez

1. Tecnología de Almacenamiento y Reducción de CO₂/NO_x (CNSR): Un Nuevo Concepto para el Tratamiento de Gases de Combustión

Objetivo

Proponer una alternativa para mitigar el calentamiento global utilizando el CO₂ emitido por fábricas como materia prima para la producción de urea, un fertilizante de alto valor agrícola.

Metodología

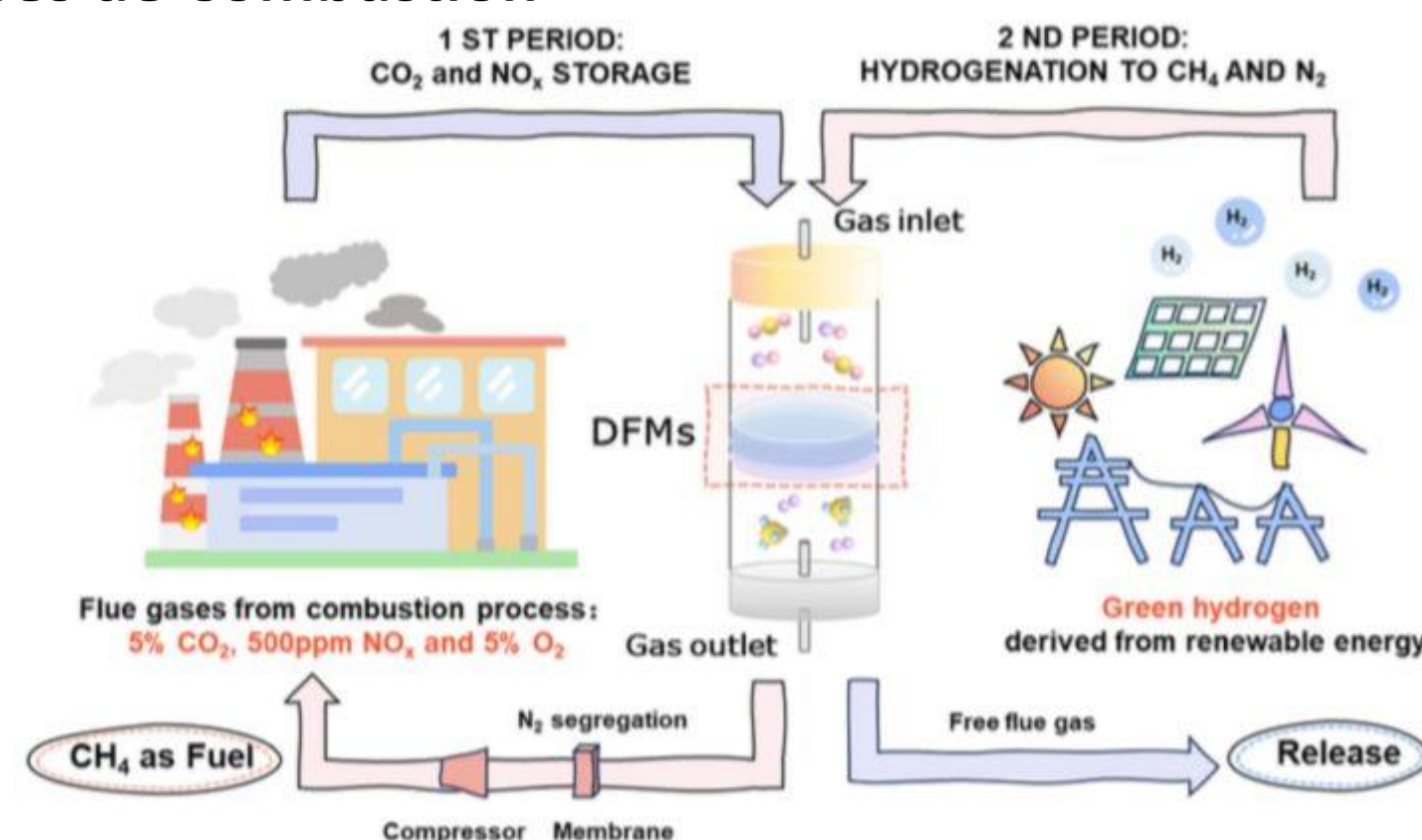
Se usó un catalizador doble (K-Pt/Ni₃AlO_x) que puede atrapar y reducir al mismo tiempo CO₂ y NO_x. Las pruebas se hicieron a 350 °C, usando hidrógeno verde (H₂) como reductor, logrando convertir el CO₂ en metano (CH₄) y los NO_x en nitrógeno (N₂) dentro de un solo sistema.

Resultados principales

Eliminación de 99.5 % de NO_x y 61 % de CO₂.

Alta selectividad (> 90 %) hacia CH₄ y N₂.

Material estable y reutilizable.



Conclusiones

Convierte un gas contaminante en producto útil. Propone un sistema eficiente, limpio y económicamente viable. Reduce emisiones y genera energía limpia (CH₄) aprovechable..

2. Una Nueva Solución al Calentamiento Global: Uso de los Gases de Combustión para Producir Urea

Objetivo

Aprovechar el CO₂ de los gases industriales como materia prima para producir urea, un fertilizante esencial, reduciendo emisiones y generando valor agregado.



Metodología

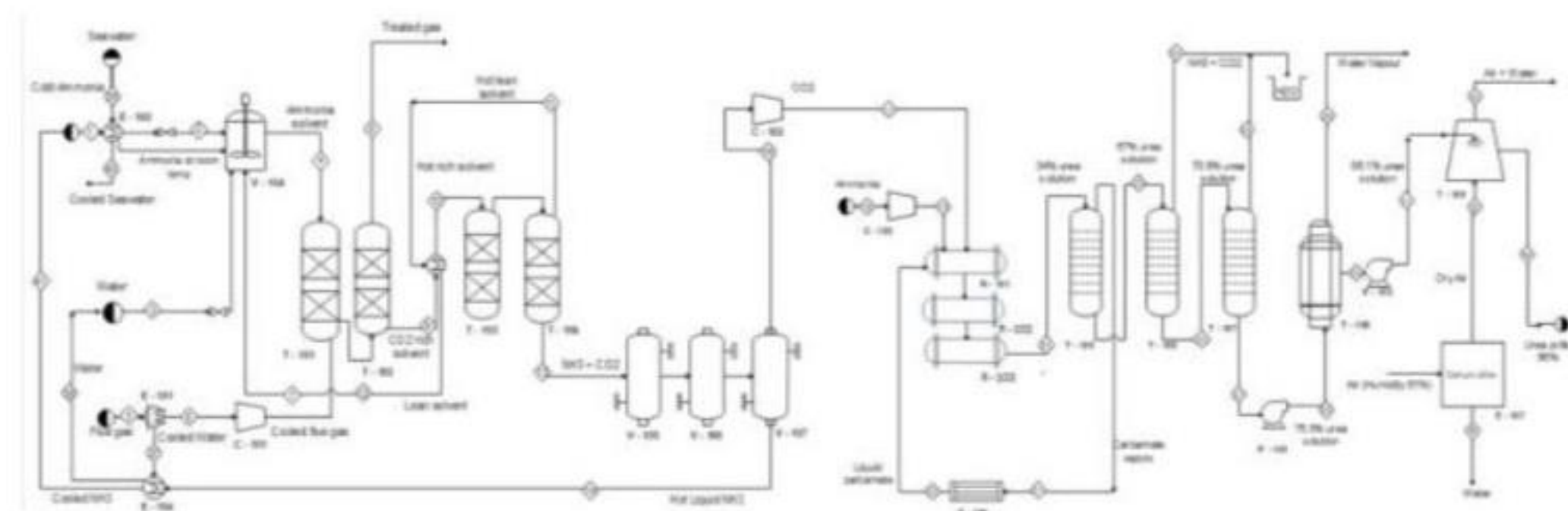
Creación de un material catalítico multifuncional (K-Pt/Ni₃AlO_x) con capacidad de almacenar y reducir contaminantes. Ensayos a 350 °C con hidrógeno verde, promoviendo reacciones de reducción controlada. Estudio de selectividad, estabilidad y eficiencia del material tras varios ciclos.

Resultados principales

99.5 % eliminación de NO_x y 61 % de conversión de CO₂. Alta selectividad (> 90 %) hacia CH₄ y N₂. Material estable y regenerable, viable para uso industrial continuo. Cero emisiones y reducción efectiva de gases de efecto invernadero.

Conclusiones

Convierte un contaminante en un producto útil mediante un proceso limpio y viable.



3. Tecnología Piloto para la Captura de Carbono en Gases de Antorcha de Refinería Usando Adsorbentes de Bajo Costo



Objetivo

Desarrollar una planta piloto funcional y de bajo costo para capturar gases contaminantes de las antorchas de refinería, reduciendo emisiones sin requerir equipos costosos.

Metodología

Uso de soda-lime (Ca(OH)₂ + NaOH) y bentonita modificada como adsorbentes.

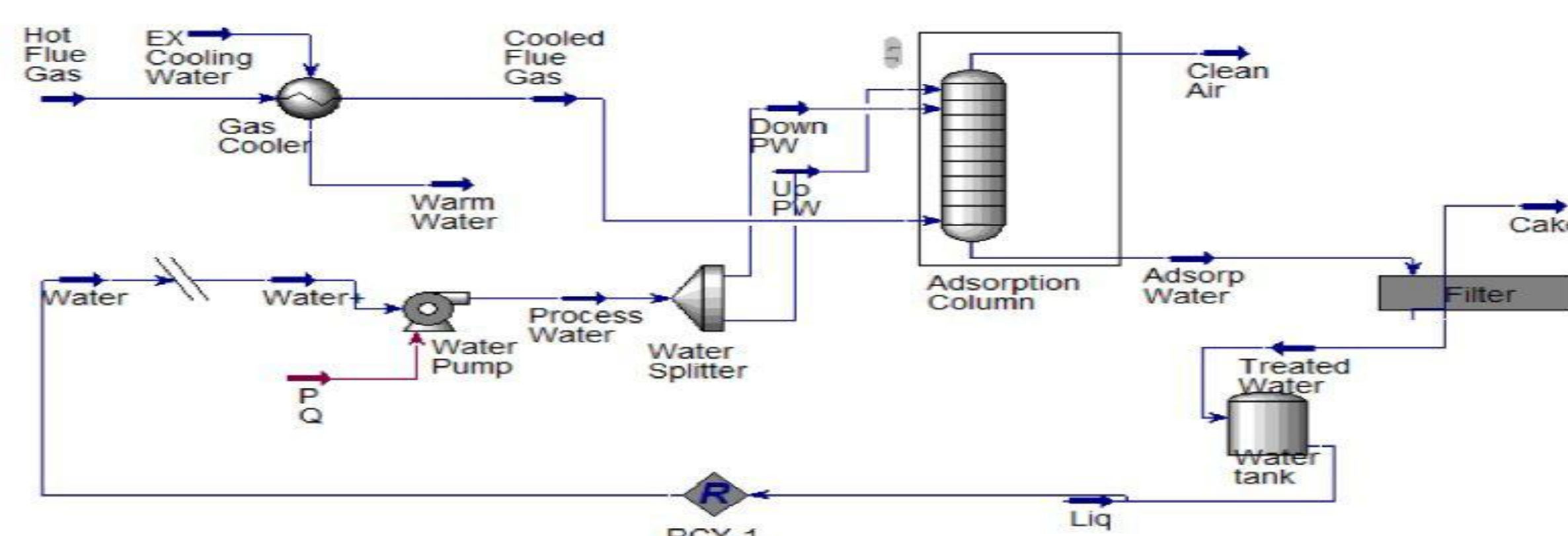
Columna de adsorción con inyección de gas y agua para mejorar la eficiencia, evaluación de la remoción de CO₂, NO_x, CO y compuestos orgánicos.

Resultados principales

Captura: 93 % CO₂, 86 % NO_x, 62 % CO y 55 % hidrocarburos. Genera CaCO₃ (piedra caliza) útil para enriquecer suelos. Proceso estable, no tóxico y escalable.

Conclusiones

Solución económica, simple y sostenible para limpiar gases industriales. Aplicable a refinerías y plantas químicas reales.



INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA
COLEGIO MAYOR
DE ANTIOQUIA®



Tratamiento de Gases Residuales y Captura de CO₂: Tecnologías Emergentes y Sostenibles

Integrantes: Laura Melisa Diaz Correa, Karen Londoño Vásquez

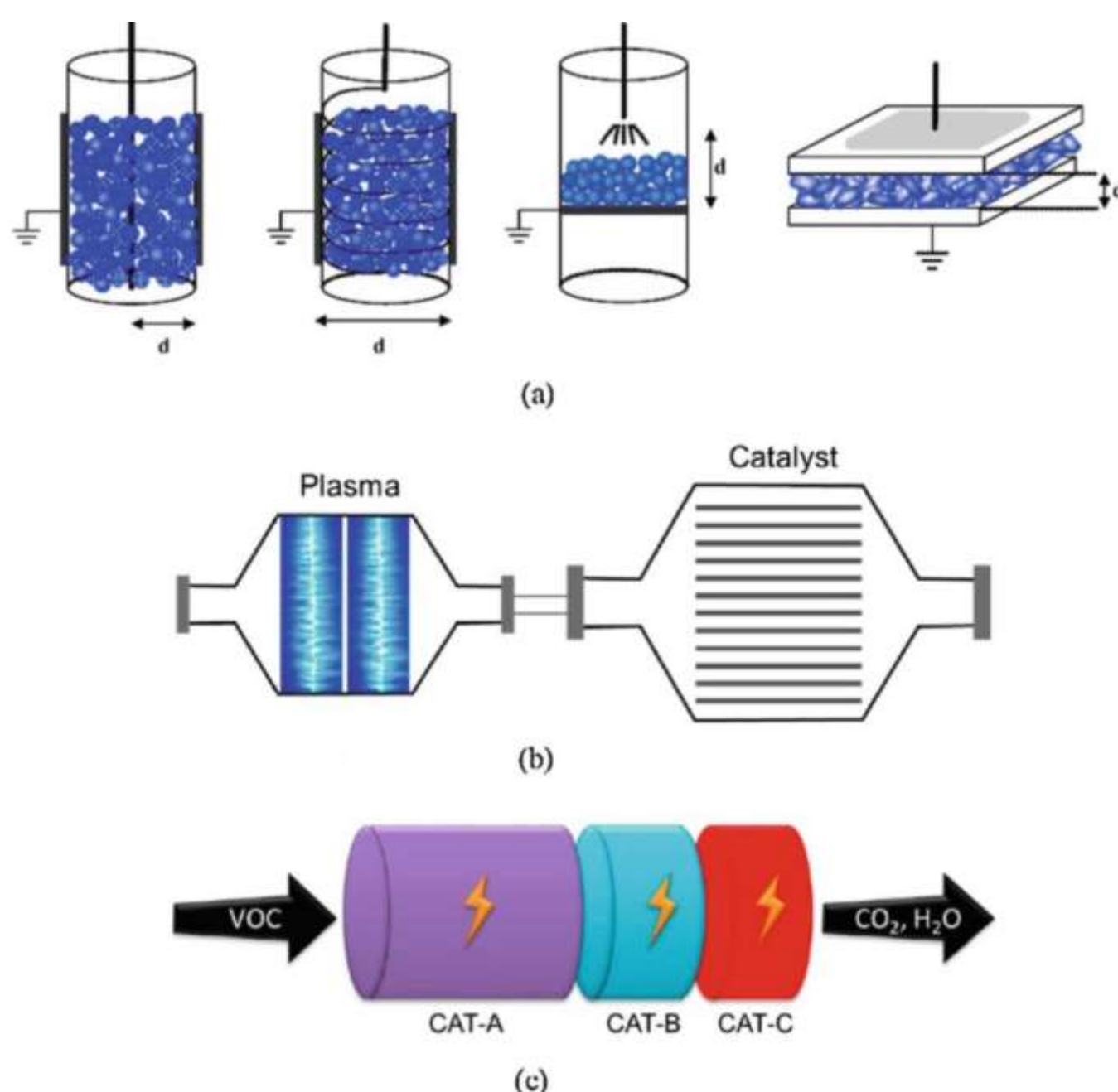
La contaminación atmosférica causada por emisiones industriales, principalmente de COVs, NOx y CO₂, es un grave problema ambiental del siglo XXI.

Para reducir su impacto, la ciencia ha desarrollado tecnologías sostenibles como el plasma catalítico no térmico, los biorreactores de membrana y la absorción de CO₂ en materiales avanzados, que sustituyen los métodos tradicionales y disminuyen el consumo energético y la generación de residuos tóxicos..

1. Plasma catalítico no térmico.

Basado en la combinación de descargas eléctricas de plasma con catalizadores sólidos, este método genera radicales reactivos (O, OH, O₃) que oxidan los contaminantes.

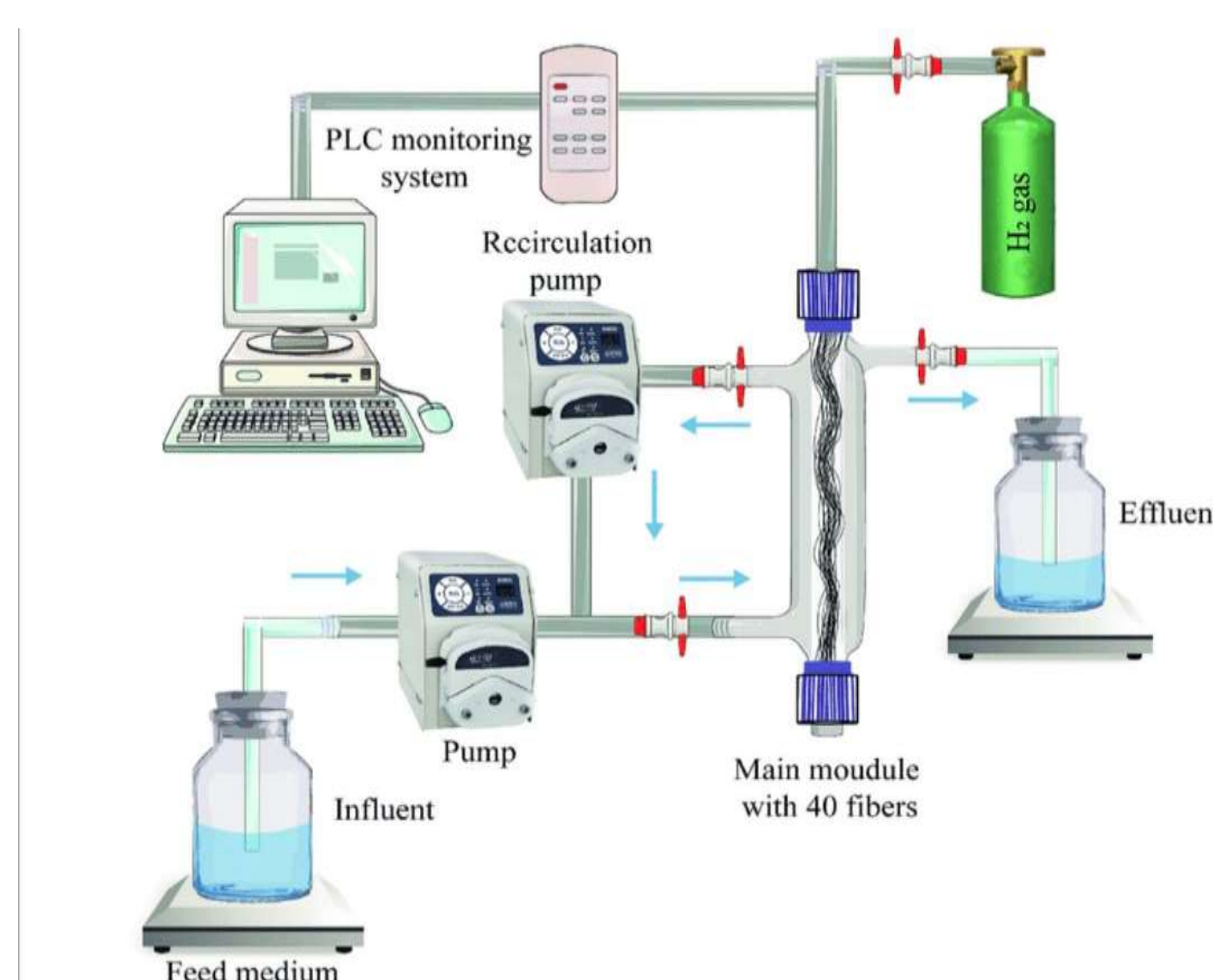
- Mejora la eficiencia energética y aumenta la mineralización de compuestos orgánicos.
- Los catalizadores (TiO₂, MnO₂, Al₂O₃, zeolitas) actúan dentro o después de la zona de plasma, degradando COVs y NOx.
- Se logra una reducción del 90–99% de contaminantes y una mayor conversión a CO₂ y H₂O.



2. Biorreactores de membrana para gases.

Los biorreactores de membrana (MBRWG) combinan la difusión selectiva de gases con la biodegradación microbiana.

- Los contaminantes gaseosos atraviesan una membrana microporosa o densa hacia una biopelícula donde son degradados.
- Ofrecen ventajas sobre los biofiltros tradicionales:
 - Mejor control de humedad,
 - Evitan desactivación microbiana,
 - Permiten tratar compuestos poco solubles o clorados.
- Limitaciones actuales: costo de construcción y validación a gran escala.

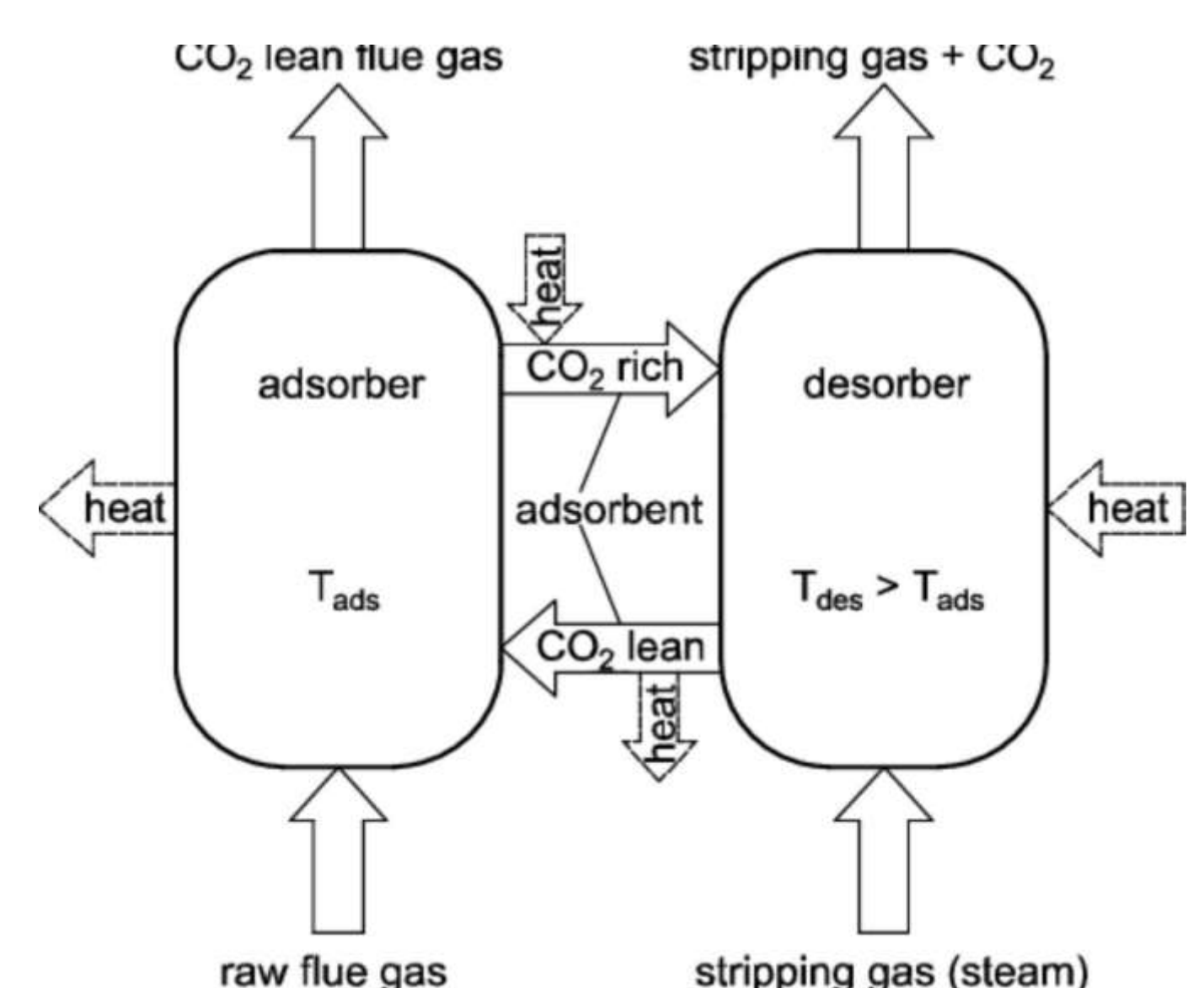


3. Adsorción de CO₂ en gases de combustión.

La captura poscombustión de CO₂ mediante adsorbentes sólidos es una estrategia clave contra el calentamiento global.

Los materiales más prometedores incluyen:

- Carbones activados y nanotubos de carbono: económicos y estables, pero con baja selectividad.
- Zeolitas: alta capacidad y selectividad, aunque sensibles a la humedad.
- MOFs (estructuras metal-orgánicas): alta área superficial y capacidad ajustable, aunque aún costosos.



CONCLUSIONES

Las tres tecnologías ofrecen alternativas sostenibles para reducir gases contaminantes.

- ✓ El plasma catalítico es rápido y versátil, ideal para contaminantes complejos.
- ✓ Los biorreactores con membranas son ecológicos y de bajo consumo energético.
- ✓ La adsorción de CO₂ es clave para mitigar el calentamiento global.
- ✓ La integración de estas tecnologías es una estrategia prometedora hacia una industria más limpia y circular.

Referencias

- Sayari, A., Belmabkhout, Y., & Serna-Guerrero, R. (2011). Flue gas treatment via CO₂ adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 171(2), 760–774.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.02.007>
- Kumar, A., Dewulf, J., & Van Langenhove, H. (2007). Membrane-based biological waste gas treatment. *Chemical Engineering Journal*.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.06.006>
- Van Durme, J., Dewulf, J., Leys, C., & Van Langenhove, H. (2008). Combining non-thermal plasma with heterogeneous catalysis in waste gas treatment: A review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 78(3–4), 324–333.
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2007.09.035>



XXVI SEMANA DE LA FACULTAD

ARQUITECTURA E INGENIERÍA

Análisis de Tecnologías para el Tratamiento y Purificación de Gases y la Mitigación del Cambio Climático (tratamiento de gases)

Introducción

El crecimiento del consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente CO₂, representan uno de los mayores desafíos actuales.

Las actividades industriales, el transporte y la generación eléctrica, basadas en combustibles fósiles, han elevado las concentraciones de CO₂ a niveles que amenazan la estabilidad climática global.

Frente a esto, la ingeniería y la ciencia han desarrollado alternativas que buscan reducir las emisiones y optimizar los recursos energéticos.

Principales líneas de acción:

1. Purificación del gas natural para eliminar impurezas.
2. Mitigación biológica mediante microalgas.
3. Uso de materiales avanzados como zeolitas.



Métodos

Purificación del gas natural (Ekpotu et al., 2023)

Procesos criogénicos: separan CO₂, H₂S y N₂ mediante enfriamiento extremo.

Absorción: disolventes líquidos (aminas) que retienen contaminantes.

Adsorción: materiales porosos (zeolitas, carbón activado).

Membranas híbridas: combinan métodos para reducir costos y energía.

Mitigación del cambio climático (Panepinto et al., 2021)

Tecnologías de emisiones negativas: CCS, reforestación, biofijación.

Microalgas que capturan CO₂ y generan biomasa útil (biocombustibles, abonos, bioplásticos).

Purificación con materiales zeolíticos (Qi et al., 2023)

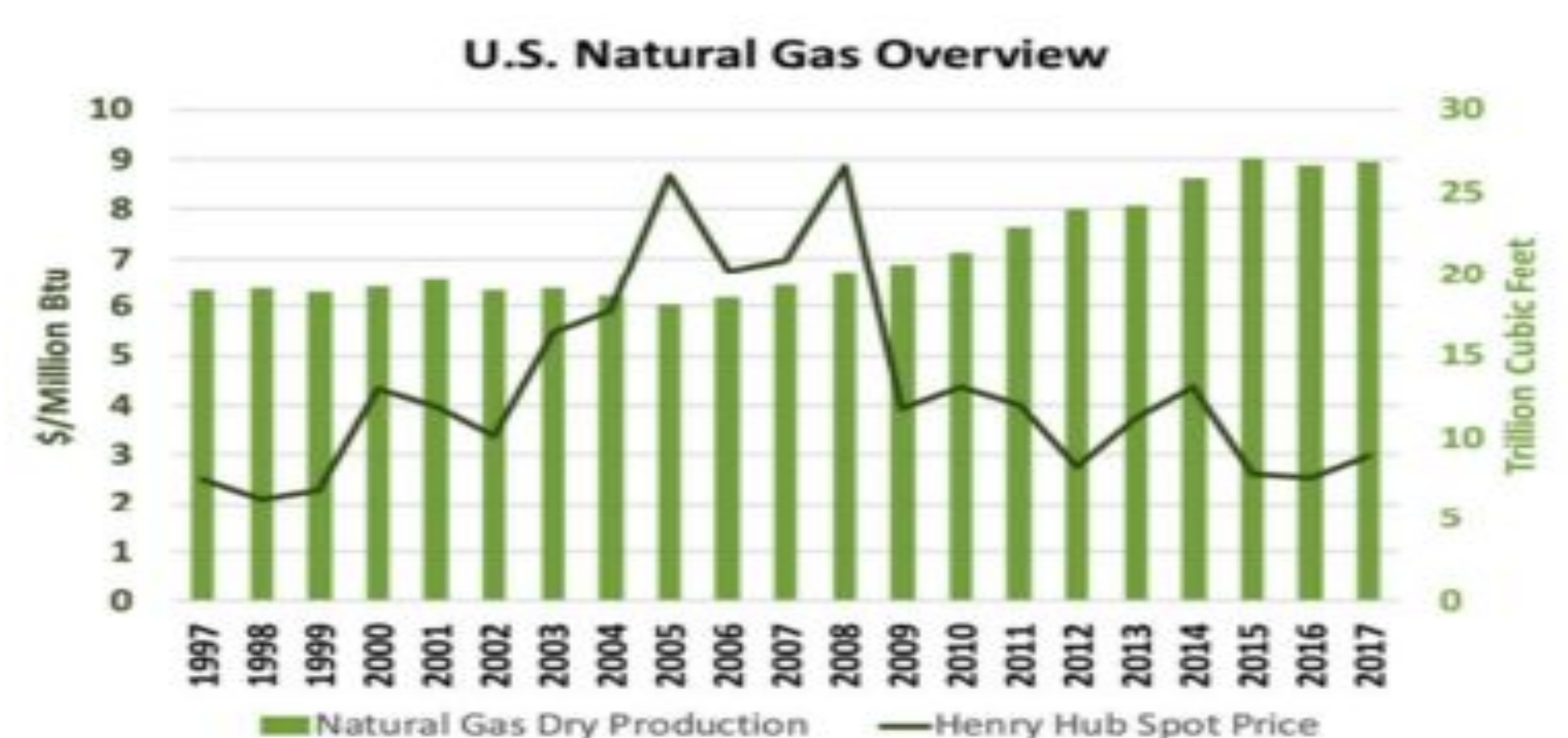
Alta porosidad y estabilidad térmica.

Separación selectiva de CO₂, CH₄ y N₂.

Membranas zeolíticas mejoradas reducen consumo energético.

Resultados y análisis

- La purificación del gas natural mejora la calidad del combustible.
- La biofijación con microalgas tiene potencial industrial y ecológico.
- Las zeolitas capturan eficazmente gases de efecto invernadero.
- La integración física, química y biológica logra mitigación más efectiva.



Conclusiones

La sostenibilidad energética depende de combinar múltiples enfoques tecnológicos.

La purificación del gas natural contribuye a una energía más limpia;

la biofijación de CO₂ con microalgas ofrece una solución natural y renovable;

y las zeolitas proporcionan materiales avanzados para la captura selectiva de gases.

El reto actual es reducir costos, aumentar eficiencia e integrar energías renovables.

Con innovación y cooperación interdisciplinaria, la ingeniería puede liderar la transición hacia un futuro más limpio, sostenible y resiliente.

Estas estrategias reflejan cómo la innovación tecnológica puede contribuir a la sostenibilidad y a la lucha contra el cambio climático.



ARQUITECTURA E INGENIERÍA

Comportamiento de los gases

Autores: Daniel Estiven Vaca Caicedo - Camilo Luna Osorio - Mariana Hoyos Nieto

Química II

Docente: Carlos Fidel Granda Ramírez

Fundamentos teóricos

- Este artículo educativo explica las leyes fundamentales que describen el comportamiento de los gases ideales. Expone las leyes de Boyle, Charles y Avogadro, mostrando cómo cada una relaciona presión, volumen, temperatura y cantidad de gas bajo condiciones controladas. A partir de estas relaciones empíricas, se construye la Ecuación del Gas Ideal ($PV = nRT$), que unifica los comportamientos observados. El texto también destaca las suposiciones del modelo ideal (moléculas sin volumen y sin interacciones) y su utilidad para comprender sistemas reales aproximados. Sirve como base teórica para el estudio moderno del comportamiento gaseoso y la termodinámica

Avances experimentales

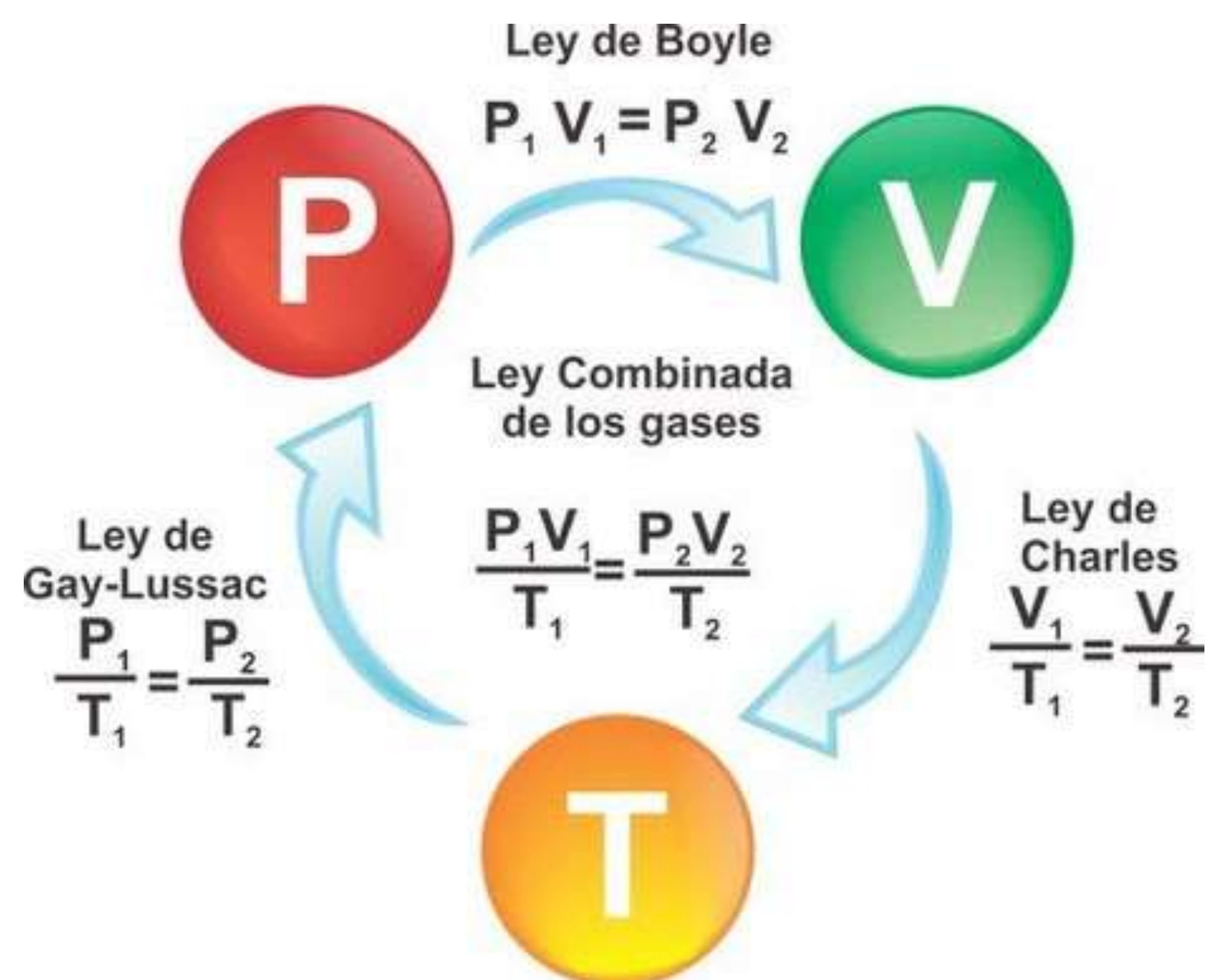
- Este estudio, publicado en *ScienceDirect*, representa los avances experimentales y teóricos en la comprensión del comportamiento de los gases reales. A diferencia del modelo ideal, analiza las interacciones intermoleculares, los efectos de alta presión y baja temperatura y la aplicación de ecuaciones de estado corregidas (como la de Van der Waals). El artículo discute el uso de modelos computacionales y técnicas espectroscópicas para ajustar las predicciones teóricas a los datos experimentales, demostrando cómo la ciencia moderna amplía la validez del modelo clásico de gas ideal.

Aplicaciones actuales

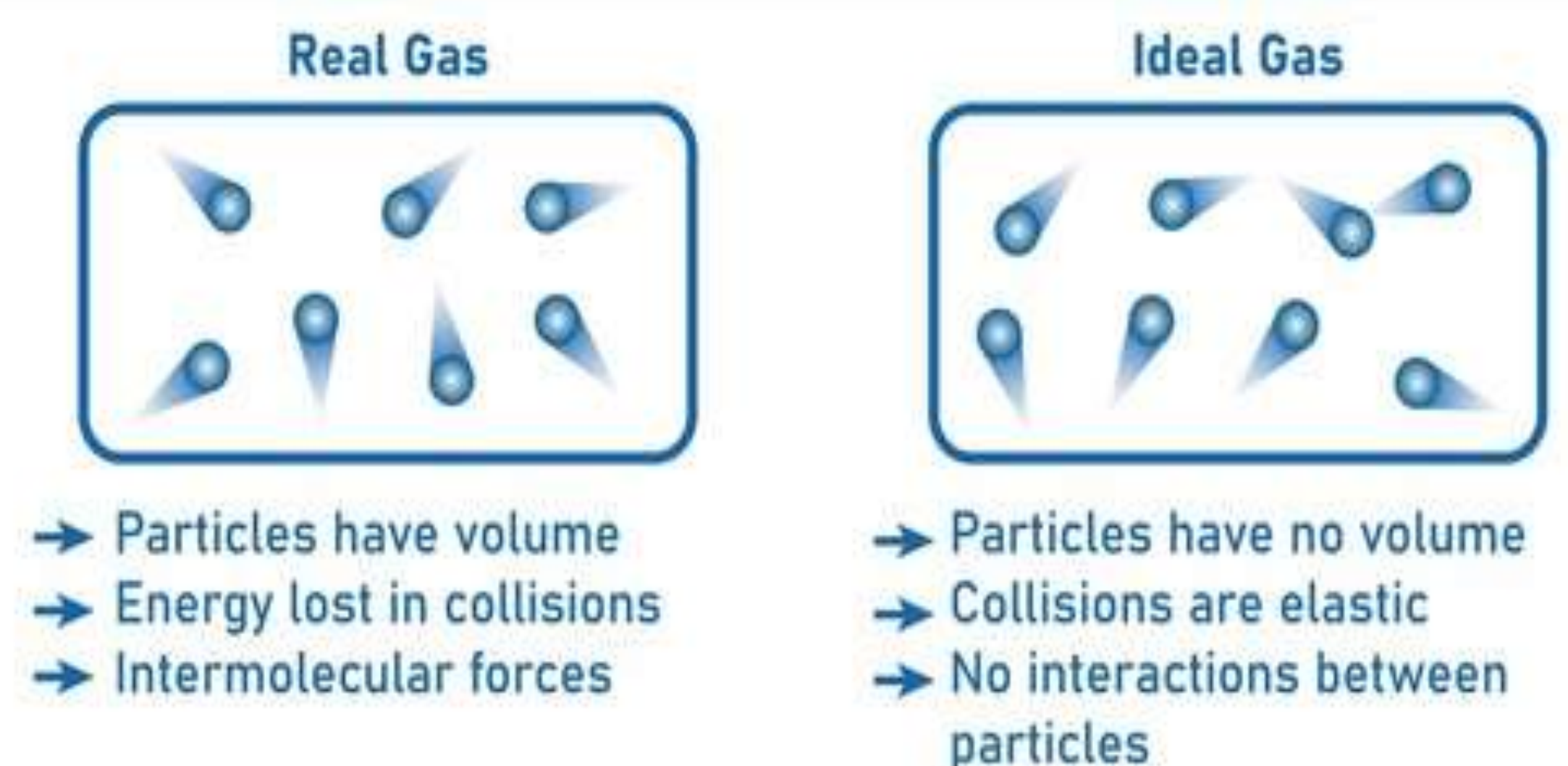
- Este trabajo se centra en las aplicaciones prácticas y tecnológicas del comportamiento de los gases. Presenta estudios sobre el uso de modelos gaseosos en procesos industriales, mediciones ambientales y tecnologías energéticas. Analiza cómo las desviaciones del comportamiento ideal pueden aprovecharse para diseñar sistemas más eficientes en laboratorios e industrias químicas. También se mencionan métodos de análisis termodinámico y simulación matemática utilizados en contextos de ingeniería moderna.

Referencias.

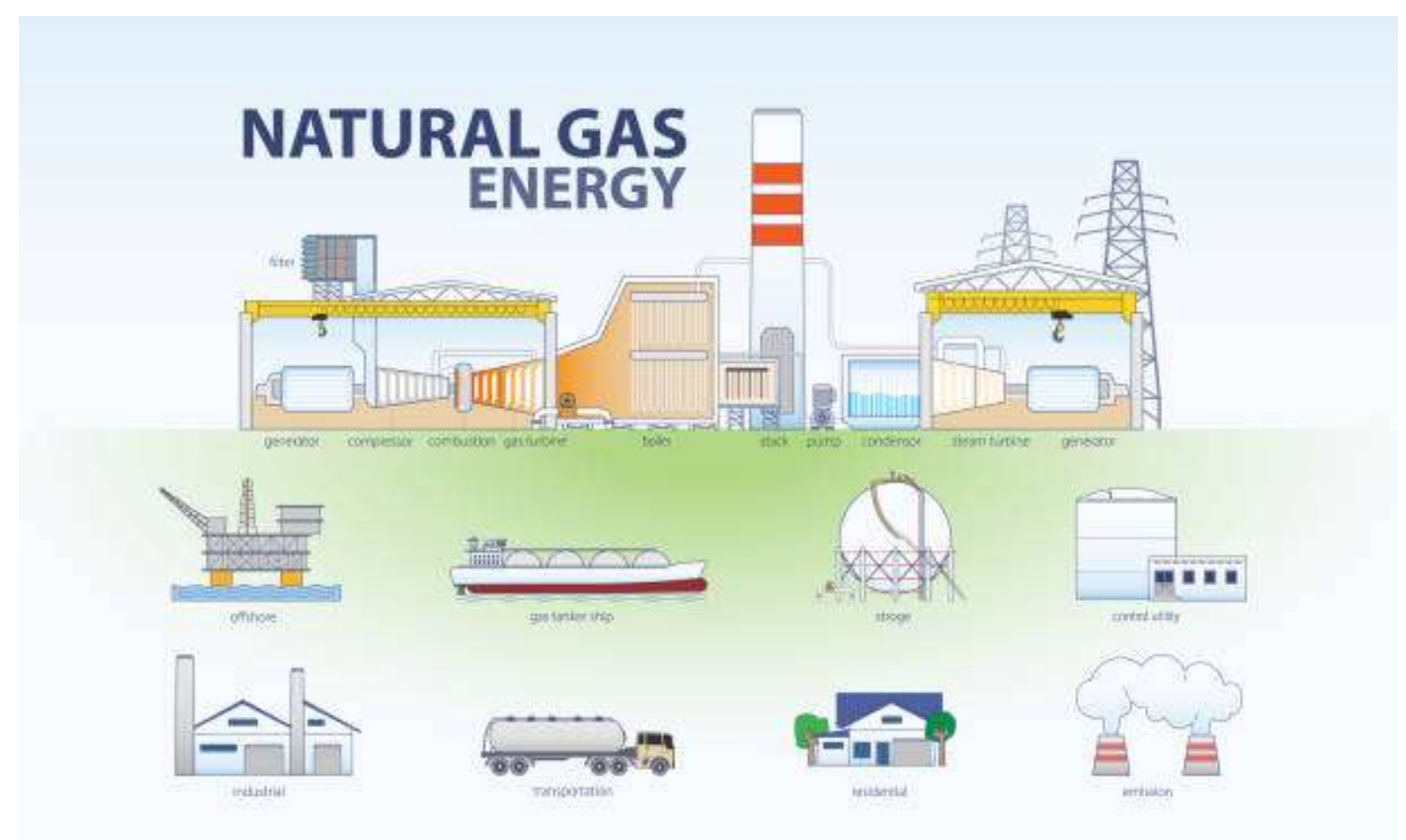
- https://chem.libretexts.org/Courses/City_College_of_San_Francisco/CCSF_Chemistry_Resources/02%3A_CHE_201_-_General_Chemistry_I/2.06%3A_Ideal_Gas_Behavior/2.6.02%3A_The_Gas_Laws



Real Gas and Ideal Gas



shutterstock.com · 2219162953



- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875510022003420>
- <https://mlcjournals.ru/s231243500026202-0-1/?sl=en>



INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA
COLEGIO MAYOR
DE ANTIOQUIA®

