

Innovación en el tratamiento de residuos peligrosos en Uruguay: estudio experimental de la combustión latente de tierras contaminadas con hidrocarburos

Innovation in hazardous waste treatment in Uruguay: experimental study of smouldering combustion of hydrocarbon-contaminated soils

Inovação no tratamento de resíduos perigosos no Uruguai: estudo experimental da combustão lenta de solos contaminados por hidrocarbonetos

 **MIRIAN E. CASCO** (1)

 **SANTIAGO LASSUS** (2)

 **MARTÍN TORRES BRUNENGO** (3, 4)


 **ANDRÉS CUÑA** (3, 4)

(1) Grupo de Materiales, Energía y Medioambiente, Departamento de Ingeniería, Universidad Católica del Uruguay, Montevideo, Uruguay.

(2) Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

(3) Laboratorio de Energías Renovables, Instituto Polo Tecnológico de Pando, Facultad de Química, Universidad de la República, Pando, Canelones, Uruguay.

(4) Área Fisicoquímica, DETEMA, Facultad de Química, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

RECIBIDO: 6/6/2025 → APROBADO: 7/11/2025  mtobru@fq.edu.uy

RESUMEN

Este trabajo presenta el estudio experimental de la combustión latente (CL) aplicada al tratamiento de tierras contaminadas con hidrocarburos. Se empleó un reactor de CL a escala de laboratorio. Se evaluaron cuatro mezclas con diferentes proporciones de combustible auxiliar, analizando la autosostenibilidad del proceso, la remoción de hidrocarburos y el costo energético asociado. El residuo se caracterizó mediante análisis elemental, análisis próximo, termogravimetría y determinación del poder calorífico. Los resultados evidenciaron la necesidad de utilizar un combustible auxiliar para iniciar la reacción de CL. Para esto, se seleccionó aserrín de abeto y se prepararon cuatro mezclas con arena y tierra contaminada (M1, M2, M3 y M4) para evaluar su influencia en la autosostenibilidad del proceso. Los resultados indican que la M4, conteniendo un 10 %

de aserrín y 90 % de tierra contaminada permitió mantener la CL, logrando una remoción del 95,23 % de los hidrocarburos. Adicionalmente, el análisis de costos estimó un valor de 0,3224 USD/kg de residuo tratado, destacando la viabilidad económica de la tecnología y ampliando las opciones de disposición final del residuo. La implementación de CL en Uruguay representa una alternativa eficiente y accesible para la gestión de residuos peligrosos, reduciendo la dependencia de métodos convencionales y promoviendo soluciones innovadoras.

Palabras clave: remediación ambiental, tecnología sostenible, proceso de baja energía, material peligroso, valorización.

ABSTRACT

This study presents the experimental investigation of self-sustained smouldering (SSS) applied to the treatment of hydrocarbon-contaminated soils. A laboratory-scale smouldering reactor was employed. Four mixtures with different proportions of auxiliary fuel were evaluated, analysing the self-sustainability of the process, hydrocarbon removal, and the associated energy cost. The residue was characterised through elemental analysis, proximate analysis, thermogravimetry, and determination of the calorific value. The results demonstrated the need for an auxiliary fuel to initiate the SSS reaction. Spruce sawdust was selected for this purpose, and four mixtures containing sand and contaminated soil (M1, M2, M3, and M4) were prepared to assess their influence on process self-sustainability. The results indicate that mixture M4, containing 10 % sawdust and 90 % contaminated soil, is SSS and achieved a 95.23 % hydrocarbon removal. Additionally, the cost analysis estimated a value of 0.3224 USD/kg of treated residue, highlighting the economic viability of the technology and broadening the available options for final waste disposal. The implementation of smouldering combustion in Uruguay represents an efficient and accessible alternative for the management of hazardous waste, reducing dependence on conventional methods and promoting innovative solutions.

Keywords: environmental remediation, sustainable technology, low-energy process, hazardous material, valorization.

RESUMO

Este estudo apresenta a investigação experimental da combustão latente (CL) aplicada ao tratamento de solos contaminados por hidrocarbonetos. Utilizou-se um reator de CL em escala de laboratório. Foram avaliadas quatro misturas com diferentes proporções de combustível auxiliar, analisando a autossustentabilidade do processo, a remoção de hidrocarbonetos e o custo energético associado. O resíduo foi caracterizado por meio de análise elementar, análise imediata, termogravimetria e determinação do poder calorífico. Os resultados demonstraram a necessidade de utilizar um combustível auxiliar para iniciar a reação de CL. Para isso, selecionou-se serragem de abeto e prepararam-se quatro misturas com areia e solo contaminado (M1, M2, M3 e M4) para avaliar sua influência na autossustentabilidade do processo. Os resultados indicam que a mistura M4, contendo 10 %

de serragem e 90 % de solo contaminado, permitiu manter a CL, alcançando uma remoção de 95,23 % dos hidrocarbonetos. Adicionalmente, a análise de custos estimou um valor de 0,3224 USD/kg de resíduo tratado, destacando a viabilidade econômica da tecnologia e ampliando as opções de disposição final do resíduo. A implementação da CL no Uruguai representa uma alternativa eficiente e acessível para a gestão de resíduos perigosos, reduzindo a dependência de métodos convencionais e promovendo soluções inovadoras.

Palavras-chave: remediação ambiental, tecnologia sustentável, processo de baixa energia, material perigoso, valorização.

INTRODUCCIÓN

La CL se define como una reacción exotérmica, de baja temperatura y sin llama que se propaga lentamente a través de un combustible poroso o un combustible esparcido en un medio poroso inerte (Rein et al., 2007) (Torero et al., 2020). Este fenómeno se encuentra presente en todo tipo de incendios (forestales, residenciales, industriales), motivo por el cual se ha convertido en un tema de estudio en el contexto de prevención de incendios (Santoso et al., 2019). Sin embargo, en los últimos años ha surgido una nueva tecnología basada en la CL como una alternativa económica y eficiente para el tratamiento de residuos (Fu et al., 2024), superando a métodos convencionales como el relleno sanitario, la disposición en tierra o la incineración, entre otros. Los métodos convencionales no pueden tratar residuos de elevada humedad ya que implica un alto consumo energético para su secado si se quieren incinerar o requiere la necesidad de grandes extensiones de terreno para su disposición final. Adicionalmente, se suma el problema logístico de mover grandes volúmenes de residuos. Si este es considerado peligroso, la gestión y disposición conlleva costos significativamente más elevados.

Para aplicar la CL a residuos de manera efectiva y que además sea atractiva desde un punto de vista energético, es clave que el proceso alcance condiciones de autosostenibilidad. Esto quiere decir que la fuente de energía externa solo se requiere para la etapa de calentamiento de combustible hasta una cierta temperatura donde los procesos de devolatización comienzan a ocurrir. Una vez que se enciende, la energía almacenada en el residuo a tratar debe ser suficiente para generar el calor necesario para las reacciones posteriores (evaporación de agua y pirólisis) (Torero et al., 2020). Un medio poroso inerte para proporcionar permeabilidad, suficiente superficie de reacción y favorecer la transferencia de calor, es un punto clave ya que permite la ignición progresiva de las áreas adyacentes, asegurando así una reacción autosostenida hasta eliminar todo el combustible disponible (Rashwan et al., 2016). Si la permeabilidad y/o la energía disponible no es suficiente y/o la transferencia de calor no es efectiva, la combustión latente se extinguirá y la propagación cesará.

Los estudios donde la CL ha sido aplicada han demostrado resultados prometedores en el tratamiento de diversos tipos de residuos de alto contenido de humedad y/o bajo poder calorífico, como lodos de plantas de tratamiento de agua (Shen et al., 2025), (Rashwan et al., 2016), heces (Yermán et al., 2017a) y residuos orgánicos en general, incluyendo la fracción orgánica de los residuos municipales y residuos agroindustriales (Shen et al., 2025), (Song et al., 2022). También ha sido efectiva para

tratar suelos contaminados con compuestos orgánicos persistentes de fase no-acuosos, como alquitrán y petróleo crudo (Switzer et al., 2014; Pironi et al., 2011). Asimismo, un trabajo reciente publicado por Torres Burrengo et al. (2006) evaluó el uso de lutitas pirobituminosas nacionales (también conocidas como esquistos bituminosos), cuyas características fisicoquímicas se asemejan a suelos contaminados por hidrocarburos. En este trabajo se demostró que el uso de combustible auxiliar mejora el proceso de CL, permitiendo una quema autosostenida de las lutitas pirobituminosas mediante la introducción de biomasa como combustible auxiliar.

Las tierras contaminadas por hidrocarburos representan un grave riesgo para los ecosistemas y la salud humana debido a la persistencia y toxicidad de estos compuestos. La presencia de hidrocarburos, como los derivados del petróleo, altera la estructura del suelo, reduce su fertilidad y afecta la biodiversidad al inhibir el crecimiento de plantas y microorganismos esenciales para el equilibrio ecológico. Además, estos contaminantes pueden infiltrarse en acuíferos, comprometiendo la calidad del agua y generando riesgos de exposición crónica para las poblaciones cercanas. La degradación de estos compuestos es lenta y costosa, lo que agrava su peligrosidad a largo plazo. Por ello, la remediación de estas áreas se ha convertido en una prioridad ambiental, requiriendo enfoques multidisciplinarios para mitigar sus impactos y restaurar la funcionalidad de los suelos afectados (Kuppusamy et al., 2016; Pinedo et al., 2013). A diferencia de métodos tradicionales, la CL minimiza la liberación de emisiones tóxicas y reduce el tiempo de tratamiento, ofreciendo una alternativa eficiente y sostenible para la recuperación de áreas degradadas (Yermán, 2016).

Como combustible auxiliar se empleó aserrín procedente de tablas de *Abies alba* (abeto blanco), obtenidas en una carpintería local de Montevideo (Uruguay). Su selección respondió a su disponibilidad inmediata en el sitio de trabajo y a su composición lignocelulósica homogénea, la cual favorece una ignición rápida y un aporte térmico estable durante la etapa inicial de la combustión. El aserrín de abeto presenta además bajos contenidos de humedad y de cenizas, propiedades adecuadas para su uso como material auxiliar en la conformación del frente de combustión. Desde el punto de vista fisicoquímico, las características reportadas para *A. alba* son comparables a las de especies de coníferas ampliamente disponibles en Uruguay, como el pino, particularmente en términos de su fracción volátil, poder calorífico y composición lignocelulósica (Curto et al., 2017). Por tanto, aunque el abeto no constituye uno de los residuos de biomasa de mayor volumen en el país, su comportamiento térmico puede considerarse representativo de biomasa residual de origen maderero utilizada como combustible auxiliar. Finalmente, el empleo de diferentes residuos lignocelulósicos para evaluar su desempeño como materiales auxiliares se alinea con las líneas de acción del Plan Nacional de Gestión de Residuos, que promueve la valorización de flujos de biomasa con potencial energético.

En este trabajo se reporta el primer reactor de CL diseñado en Uruguay a escala laboratorio para tratar tierras contaminadas con hidrocarburos, a la cual se le introdujo aserrín de madera de abeto para mejorar el proceso de combustión de la materia orgánica. El reactor de CL se encuentra instalado y operativo en el Instituto Polo Tecnológico de Pando, Área de Energías Renovables.

Las tierras contaminadas tratadas en este trabajo son representativas de los residuos que pueden generarse durante operaciones de transporte y manejo de hidrocarburos. En Uruguay, por ejemplo, se han reportado derrames de crudo de varios miles de litros, como el evento ocurrido en las inmediaciones de la zona de la boya petrolera de José Ignacio en 2018 (aprox. 5800 L), que requirió la remoción y gestión de suelos contaminados. Estos antecedentes permiten dimensionar la relevancia de contar con alternativas de tratamiento accesibles y eficientes para este tipo de residuos.

De acuerdo con consultas públicas a empresas que gestionan este tipo de residuo, se estima que su disposición conlleva un costo de ~ 45 \$UYU/kg, ya que se considera dentro de la Categoría I de los residuos sólidos industriales según el Decreto N.º 182/013 (Uruguay, 2013). Es importante destacar que la ocurrencia de derrames no se limita a esta industria, sino que también es frecuente en parques eólicos, por ejemplo, el mayor impacto ambiental luego de la mortandad de aves es causado por los derrames de aceites y lubricantes en el suelo (Uruguay. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, 2015). En este sentido, el campo de aplicación de la CL en el país es muy amplio e incluso está muy distribuido a lo largo del territorio nacional solo teniendo en cuenta la industria energética.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es el estudio experimental de la CL de tierras contaminadas con hidrocarburos utilizando un reactor de escala de laboratorio, como alternativa de tratamiento de residuos peligrosos. Se busca evaluar las condiciones de operación del reactor para que la reacción sea autosostenida mediante la incorporación de biomasa con el fin de mejorar las condiciones de la autosostenibilidad y que se logre remover el contaminante y, de esta manera, ampliar las posibilidades de su disposición final. Adicionalmente, se realiza un análisis básico del costo del tratamiento por Kg de residuo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de materiales y acondicionamiento

La tierra contaminada fue suministrada por el Laboratorio de Medio Ambiente (LAMA) de la Administración Nacional de Combustible, Alcohol y Portland de Uruguay (ANCAP). Esta procede de la remoción de tierra posterior al derrame de crudo ocurrido en diciembre de 2019, en la planta intermedia del oleoducto entre José Ignacio y La Teja. Las muestras recibieron un tratamiento de desgranado y homogeneización previo a ser analizadas y tratadas en el reactor.

La arena utilizada para realizar las mezclas fue adquirida en Gianni (arena para filtro de piscina) con un tamaño de grano entre 1.5 y 3 mm, y una humedad relativa de 0,3 %.

El aserrín de madera de abeto, seleccionado como combustible auxiliar, fue suministrado por un aserradero de la ciudad de Montevideo, y fue usado en las condiciones en las cuales fue suministrado.

Análisis próximo

El análisis próximo para determinación de volátiles, carbono fijo y cenizas se realizó en las condiciones establecidas por las normas ISO 562 (International Organization for Standardization, 2010), indicadas para el estudio de combustibles sólidos tipo carbón, madera y biomasa. La densidad aparente fue calculada mediante el cociente entre una masa de muestra determinada mediante balanza analítica, y el volumen ocupado por la muestra determinado con bureta graduada.

Análisis termogravimétrico (TGA)

Los experimentos de análisis termogravimétrico de los materiales de partida fueron realizados en atmósfera oxidante (aire) y en atmósfera inerte (nitrógeno) con un flujo de 50 mL min⁻¹, utilizando un equipo marca Shimadzu, modelo TGA-50. El rango de temperatura estudiado fue desde temperatura ambiente hasta los 900 °C, utilizando una velocidad de calentamiento de 20 °C min⁻¹ y empleando cápsulas de platino.

Análisis elemental

El análisis elemental (C, H, N, y S) se realizó mediante un analizador CHNS/O Thermo Scientific FLASH 2000. Se colocaron muestras de aproximadamente 2-3 mg en cápsulas, las cuales se introdujeron en el autosampler Thermo Scientific MAS 200R, que a su vez alimentó un reactor de oxidación/reducción mantenida a una temperatura de 900-1000 °C con un tiempo de residencia de 1 minuto. A alta temperatura, se produce una reacción exotérmica entre el oxígeno suministrado y la cápsula de estaño, lo que provoca un aumento de la temperatura hasta 1800 °C durante unos segundos. A esta temperatura, tanto las sustancias orgánicas como las inorgánicas se convierten en gases elementales, que son separados por cromatografía después de la reducción, a un flujo de 130 cm³/min utilizando helio de alta pureza como gas portador. Luego, la composición del gas se determina mediante un detector de conductividad térmica (TCD) de alta sensibilidad.

Cuantificación del poder calorífico

El poder calorífico superior (PCS) fue medido utilizando una bomba calorimétrica modelo Parr 1341, equipada con un termómetro de precisión 6672. La determinación se realizó utilizando 0,5 g de muestra. Para cada medición se aplicó la corrección por el calor de formación de ácido de acuerdo con el manual de la bomba calorimétrica. El Poder Calorífico Inferior (PCI) se calculó a partir del PCS y los resultados del análisis elemental.

Mezclas a tratar en el reactor

En base a los resultados de los análisis fisicoquímicos de las tierras contaminadas y del aserrín de madera de abeto (a partir de ahora combustible auxiliar), se prepararon cuatro mezclas (M1, M2, M3 y M4) para tratar en el reactor de CL cuyos porcentajes de composición (combustible auxiliar, arena, tierra contaminada) se resumen en la Tabla 1.

Cabe destacar que la arena no aporta poder calorífico, pero agrega porosidad y firmeza a la mezcla, que permite un flujo homogéneo de aire a través del cuerpo de reactor. Para corroborar si la tierra puede funcionar por sí sola como medio poroso se decide preparar una muestra (M4) sin contenido de arena.

TABLA 1. Porcentaje de los componentes de las mezclas tratadas en el reactor de CL.

Mezcla	Combustible auxiliar (%)	Arena (%)	Tierra Contaminada (%)	Humedad Ponderada (%)
M1	10	90	0	1,37
M2	10	45	45	9,34
M3	10	22,5	67,5	13,32
M4	10	0	90	17,30

Cuantificación de materia orgánica extraíble

El contenido de material extraíble con n-hexano fue determinado siguiendo el protocolo establecido en el Método EPA 9071B: Material Extraíble con n-Hexano (HEM) para Lodos, Sedimentos y Muestras Sólidas (United States Environmental Protection Agency, 1998). Paralelamente, el contenido de materia seca se cuantificó mediante secado en una balanza de secado, siguiendo procedimientos estandarizados. Ambos análisis se llevaron a cabo para la tarrina de tierra contaminada aportada por ANCAP (donde se saca la tierra para preparar las muestras a utilizar en el reactor), como en los restos de material que quedan dentro del reactor después de realizar el tratamiento de CL, con el fin de evaluar los cambios en la cantidad de materia orgánica extraíble de las muestras tras el proceso térmico y corroborar su eficacia.

Esquema del reactor y procedimiento experimental

En la Figura 1 se presenta el esquema del reactor utilizado para llevar a cabo las experiencias. El cilindro central tiene una altura de 120 cm y un diámetro interno de 10 cm, recubierto en su superficie lateral con un aislante de lana de roca para minimizar las pérdidas de calor hacia el entorno. En la base del reactor se encuentra un difusor de aire, compuesto por una pequeña tobera invertida, cubierto con grava gruesa. Sobre esta capa se dispone la resistencia, la cual se recubre con grava fina (arena), la cual no solo protege a la resistencia de una posible combustión con llama, sino que también asegura una distribución homogénea del aire hacia el cuerpo central del reactor, donde se coloca la mezcla a tratar. El aire se inyecta mediante un compresor marca Goldex de 100 L de capacidad, y el flujo se regula con un controlador marca SMC, modelo PFM750S. La resistencia es del tipo blindada CoilHeater y está controlada por un dispositivo marca Autonics, modelo TCNS. Para monitorear la temperatura, se instalaron diez termocuplas (TC1-TC10), centradas y distribuidas uniformemente a intervalos de 5 cm a lo largo del cuerpo del reactor. La TC1 es la más cercana a la resistencia, sumergida en arena,

mientras que la TC10 es la más alejada. Los datos de temperatura fueron registrados con un datalogger marca Applent, modelo AT4516.

Una vez colocada la línea de termocupas centrada en el reactor, la muestra ensayada se introdujo por la parte superior del reactor empleando una cuchara, y rellenando hasta una altura de 60 cm. Posteriormente, se cubrió con arena limpia la parte superior con fines de aislamiento.

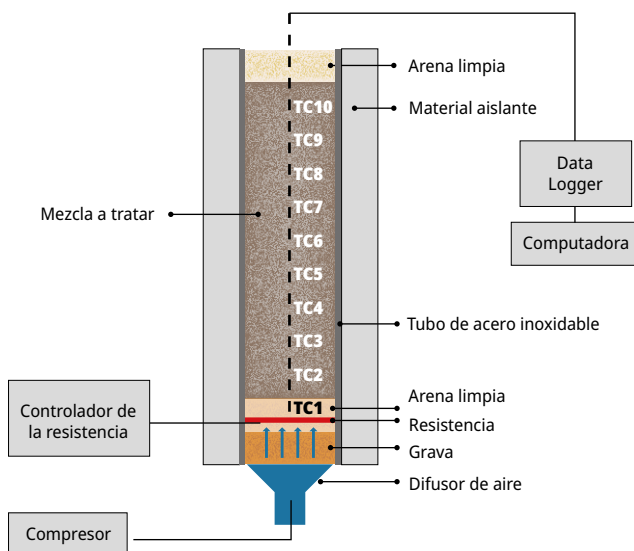


FIGURA 1. Esquema de la configuración del reactor y sus principales componentes.

Colocada la muestra y en condiciones de comenzar el experimento, se realizó un precalentamiento inicial con la resistencia eléctrica seteada a 450 °C y un flujo de aire a la entrada de 5 L/min. Una vez que la TC2 alcanzó los 250 °C (valor de ignición que indica la termogravimetría para el combustible auxiliar), se incrementó el flujo de aire a 30 L/min. Posteriormente, cuando la TC3 alcanzó su temperatura máxima se apagó la resistencia para observar si el resto de las termocupas registraban un aumento progresivo de la temperatura. Los datos de temperatura recabados mediante las termocupas se registraron en un gráfico temperatura en función del tiempo, brindando información para determinar si efectivamente la combustión se había propagado a lo largo del cuerpo del reactor de manera autosostenible. La velocidad de CL se calcula a partir del intervalo de tiempo correspondiente a la pendiente más pronunciada en el registro de temperatura de dos termopares consecutivos (esto se obtiene a partir del gráfico de temperatura vs tiempo) y de la distancia entre los termopares correspondientes, lo cual es conocido desde el momento que se ubican los termopares en el reactor. Existen muchos métodos diferentes para determinar la velocidad de CL, pero se ha comprobado que este método es el más robusto (Yermán, et al., 2017b).

Estimación del costo del proceso consumo

La estimación de costo del proceso se cuantificó teniendo en cuenta únicamente el consumo de energía eléctrica debido a la resistencia del rector, lo consumido por el compresor de aire y lo consumido por diferentes componentes electrónicos. Para cuantificar la energía eléctrica consumida por la resistencia y el compresor en los experimentos, se instalaron dos medidores comerciales de energía consumida (con una apreciación de 0.1 kWh), uno a la entrada del compresor y otro a la de la resistencia. Se registran los valores antes y después de cada experimento. Durante la preparación de las muestras se utilizó una mezcladora cuyo gasto energético fue menor a la precisión del medidor (0.1 kW), por lo que se despreció en el cálculo final. Adicionalmente se tomaron como valores de consumo de la PC de escritorio (HP), monitor (LG) y datalogger como 180, 41 y 10 W, respectivamente. Finalmente, se contabilizaron las horas de duración de cada experimento y se calculó el gasto energético en kWh. Para el cálculo del consumo en pesos uruguayos se tomó el pliego tarifario de UTE (Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas) en el momento de realización de los experimentos, conociendo que el Polo tecnológico de Pando tiene un contrato eléctrico como mediano consumidor, y considerando el mayor costo posible (funcionamiento en horario de punta, en tarifa MC1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se muestran en la Tabla 2 indican que para el residuo tratado en este trabajo el contenido de hidrocarburos es suficiente para ser considerado un residuo industrial peligroso en Uruguay (Categoría I, de acuerdo con el Decreto 182/013) (Uruguay, 2013), pero es bajo para lograr la ignición y consiguiente propagación de la combustión dado que no fue posible la determinación de su poder calorífico. El análisis fisicoquímico (Tabla 2) confirma un bajo contenido en carbono y un elevado contenido en cenizas (compuestos inorgánicos con nulo poder calorífico). Estos resultados anticipan que, por sí sola, esta tierra contaminada no puede ser tratada en un reactor de CL. Para mitigar este hecho, la estrategia es seleccionar un combustible auxiliar.

Por otro lado, el aserrín de madera de abeto es una biomasa residual que se genera en abundancia en Uruguay, contiene bajo contenido en cenizas y un elevado poder calorífico (Tabla 2), por lo que se considera una excelente opción para mezclar con las tierras contaminadas y aportar la energía necesaria para que ocurra la ignición y propagación de la combustión.

TABLA 2. Características fisicoquímicas de las tierras contaminadas y del aserrín de madera de abeto.

Análisis Elemental (% en masa) *				Análisis Próximo (% en masa, base seca)**			Contenido de Humedad (%)**	Densidad aparente (g/cm ³)	Poder Calorífico superior/ inferior (MJ/kg base seca)***
C	H	O	N	Volátiles	Carbono Fijo	Cenizas			
Aserrín de madera de Abeto									
50,41	6,82	42,14	0,14	85,83	13,68	0,49	11,02	0,51	19,85/18,34
Tierras contaminadas									
1,81	0,85	27,11	0,19	24,41	4,55	70,04	18,00	1,43	-

*incertidumbres estimadas en 1 % de la medida

** Incertidumbres estimadas en 5 % de la medida

*** Incertidumbre estimada em ± 0.20 MJ/kg

Los resultados de TGA de la tierra contaminada, realizada en atmósfera oxidante e inerte (Figura 2), son muy similares. En ambos casos, se observa únicamente una pérdida de masa en torno a los 100 °C, atribuida al contenido de humedad, sin que se detecte de manera evidente el pico correspondiente a la pirólisis o combustión de los hidrocarburos. Este resultado confirma la necesidad de emplear un combustible auxiliar. Por otro lado, el TGA del aserrín de madera de abeto, realizada en atmósfera oxidante e inerte (Figura 2), revela varias etapas de pérdida de masa. En ambas condiciones se observa una primera pérdida alrededor de los 100 °C, atribuida a la evaporación de la humedad. En atmósfera oxidante se observa un pico de pérdida de volátiles y combustión entre 250 y 350 °C, seguido de un tercer pico menor entre 325 y 470 °C. Por otro lado, en atmósfera inerte se registra una segunda pérdida de masa entre 250 y 380 °C, correspondiente a la descomposición térmica de los compuestos volátiles, asociada a los procesos de torrefacción y pirólisis de la hemicelulosa y la celulosa, representando aproximadamente el 70 % de la masa. Por otro lado, tomando en cuenta estos resultados, se selecciona la temperatura de 250 °C como la mínima temperatura a la cual se considera el inicio de ignición de la CL en el reactor.

Cabe destacar que la presencia de humedad en el residuo y en el aserrín no implica un problema, ya que se ha demostrado en la literatura que la tecnología de CL puede tratar residuos de hasta 80 % de humedad bajo las condiciones operativas adecuadas (Rashwan et al., 2016) (Shen et al., 2025). El desafío y la utilidad para la aplicación industrial es que la CL sea autosostenible. Esta condición se logra cuando la generación y retención de calor en el cuerpo del reactor supera las pérdidas de calor con el medio circundante y en procesos endotérmicos como por ejemplo la pirólisis y la evaporación de agua (Fu et al., 2024) (Rashwan et al., 2016).

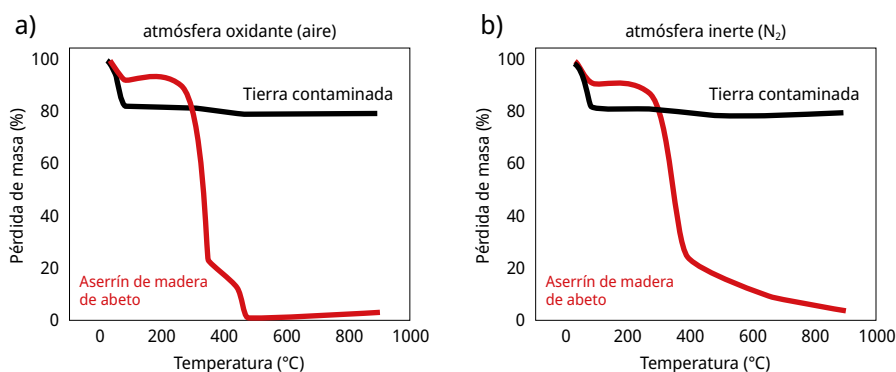


FIGURA 2. Termogravimetría de la tierra contaminada y el aserrín de madera de abeto en (a) atmósfera oxidante (aire) y (b) atmósfera inerte (nitrógeno).

La Figura 3 muestra los resultados para las cuatro mezclas tratadas en el reactor de CL. Se observa que al aumentar el contenido de tierra contaminada en la mezcla el tiempo en que tarda TC2 en llegar a 250 °C es mayor (130, 210, 300 y 340 min). Este comportamiento es directamente proporcional ($R^2 = 0.973$) al contenido de humedad de la mezcla (Tabla 1), la cual consume energía de evaporación. Evidencia de este hecho es el plateau a 100 °C al que llegan el resto de las termocuplas.

La evolución temporal del pico máximo de temperatura a lo largo del reactor, una vez que se dejó de suministrar energía térmica a través de la resistencia eléctrica, es uno de los indicadores respecto a si la CL está ocurriendo en forma autosostenible. Según se puede observar en las curvas de temperatura vs. tiempo (ver Figura 3), la temperatura máxima dentro del reactor se desplaza a lo largo del reactor manteniendo su valor acotado al rango de entre 750 y 1000 °C, lo cual confirma la autosostenibilidad del proceso de CL. Se ha observado que, para condiciones de combustión autosostenible, las temperaturas en el pico de ignición en el alquitrán y el petróleo crudo son superiores a 700 °C y 550 °C, respectivamente (Shen et al., 2025), (Pironi et al., 2011).

Además, una temperatura del pico de ignición superior a 500 °C es suficiente para asegurar que el frente de evaporación del agua se propague antes que el frente de combustión, manteniendo así reacciones autosostenibles, siempre y cuando el suministro de aire y la permeabilidad del medio sean los adecuados para la mezcla a tratar. Por otro lado, se ha observado que la CL no es autosostenible en ventanas de picos de temperaturas entre 250 °C a 400 °C (Shen et al., 2025), (Pironi et al., 2011). Y picos superiores a 1000 °C podrían indicar la transición de CL a combustión con llama (Wyn et al., 2020).

La Figura 3 muestra que para las mezclas M1, M2, M3 y M4, respectivamente, la mayoría de las termocuplas a lo largo del reactor registraron picos de temperatura que se mantuvieron, luego de apagada la resistencia, entre 500 y 1000 °C, y en ausencia de llama. Este comportamiento es un fuerte indicio de que la reacción de CL fue autosostenible a lo largo del reactor. Este hecho se corroboró mediante el análisis de las cenizas finales, en el cual se observó una disminución significativa del material extraíble con n-hexano, indicando la destrucción de la mayor parte de los hidrocarburos presentes. Adicionalmente, conociendo la posición de las termocuplas y el tiempo en que aparecen

los picos máximos de temperatura, se puede calcular la velocidad de propagación de la CL para las cuatro mezclas. Las mismas fueron de 0,387 cm/min (M1), 0,341 cm/min (M2), 0,372 cm/min (M3) y 0,194 cm/min (M4), las cuales fueron calculadas de acuerdo a la metodología empleada por Yermán et al. (Yermán et al., 2017b). Para la experiencia M4 la velocidad fue claramente menor, lo que indica que el lecho de reacción, en ausencia de arena, es más compacto provocando que el flujo de aire, la transferencia de calor, y, por tanto, el frente de reacción avance más lento que en los casos que contienen arena (Yermán et al., 2017a). Aun así, la historia de las termocupas da indicio de que la reacción fue autosostenible, es decir, que para tratar las tierras contaminadas la arena no es necesaria para aumentar la porosidad del lecho de reacción y la tierra efectivamente actúa como medio inerte de propagación del frente de reacción.

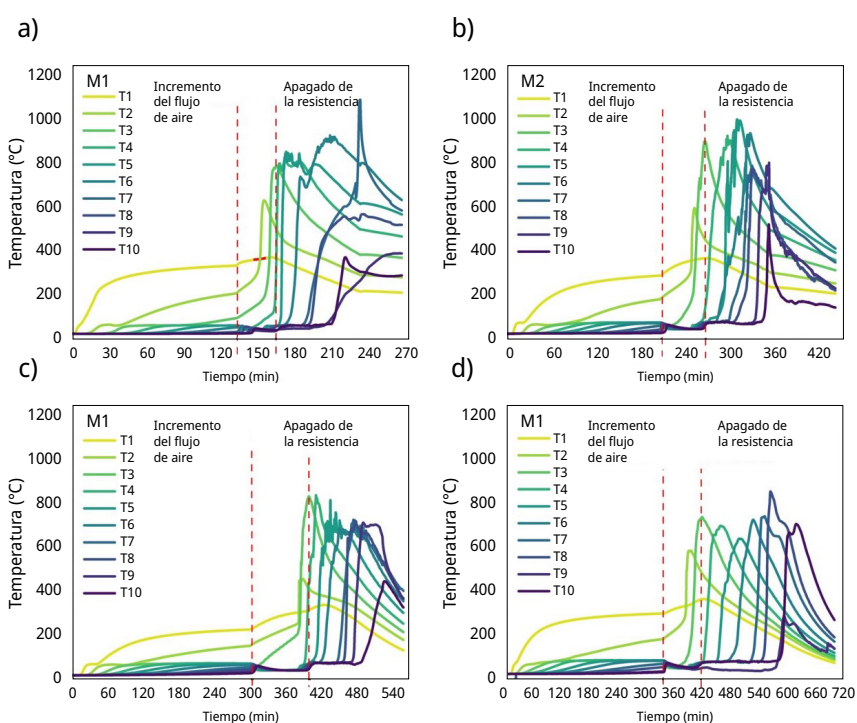


FIGURA 3. Perfil de la evolución de la temperatura con el tiempo a lo largo del eje central del cuerpo del reactor para: (a) M1, (b) M2, (c) M3 y (d) M4. Flujo de aire inicial de 5 L/min e incremento a 30 L/min.

Análisis de la tierra contaminada postratamiento

Del conjunto de mezclas estudiadas, únicamente se analizó el contenido de hidrocarburos presentes en las cenizas postratamiento de la mezcla M4. Aunque la mezcla M4 contiene un 10 % de combustible auxiliar, se destaca como la opción más adecuada entre las formulaciones estudiadas, ya que la historia de las termocupas indica que la CL cumple con las condiciones de autosostenibilidad y además, según se verá en el análisis de costos que se discute más adelante, esta mezcla resulta la alternativa más económica

prescindiendo el uso de arena. Los resultados muestran que, efectivamente, es posible eliminar hasta el 95,23 % del material extraíble con n-hexano (Tabla 3), lo que constituye un avance prometedor, ya que elimina la característica combustible del residuo (Categoría I, según el Decreto 182/013) (Uruguay, 2013), ampliando así las opciones para su disposición final. Si bien en Uruguay no existe un límite específico de hidrocarburos fijado por normativa, actualmente estos residuos suelen ser enviados a la Cámara de Industrias del Uruguay o dispuestos en el relleno sanitario de la Intendencia de Montevideo, según las características del derrame.

TABLA 3. Determinación de material extraíble con n-hexano (HEM-SOL) de las tierras contaminadas antes y después del tratamiento en el reactor de CL (M4).

Tierra contaminada con hidrocarburos	HEM-SOL mg/Kg (b.s.)*	Materia seca, %m/m (b.h.)*
Sin tratar	3800	82,5
Tratada	181	99,5

*Incertidumbres estimadas en 15 % de la medida

Por último, es importante calcular el gasto energético del tratamiento debido al uso de la resistencia y compresor de aire. La resistencia brinda la energía inicial para la ignición y el compresor suministra el flujo de aire a lo largo de todo el experimento. Los resultados para las cuatro mezclas se resumen en la Tabla 4.

TABLA 4. Consumo energético de las mezclas tratadas en el reactor de CL.

Mezcla	Consumo energético (KWh)	Costo (pesos uruguayos)	Costo (USD)*
M1	1,42	16,4	0,3845
M2	2,07	23,9	0,5604
M3	3,48	40,1	0,9402
M4	4,30	49,5	1,1606

*cambio 42,65000 pesos uruguayos/USD, valor de venta 05/06/2025 cotización Banco de la República Oriental del Uruguay.

El gasto energético total del experimento M4 (3,6 Kg de tierra contaminada) fue de 4,30 kWh, que implica un costo energético total de 49,5 \$, es decir 13,75 \$/Kg (0,32239 USD/Kg) de tierra contaminada. A modo de referencia, el tratamiento convencional de tierras contaminadas con hidrocarburos mediante disposición final suele implicar costos en el orden de 45 \$/Kg, debido a los requerimientos de transporte, acondicionamiento y manejo especializado del material. En comparación, el costo estimado para el proceso de CL evaluado en este trabajo es considerablemente menor. Esto sugiere que la CL constituye una alternativa económicamente competitiva, con la

ventaja adicional de reducir el contenido de hidrocarburos del residuo y, en consecuencia, ampliar sus opciones de disposición final.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que se logró construir un reactor de CL adecuado y de fácil operación para experimentos a escala de laboratorio. Este reactor, el primero en Uruguay, permite tratar tierras contaminadas con hidrocarburos sin la necesidad de añadir arena. La adición de aserrín de madera de abeto como combustible auxiliar fue indispensable para iniciar la reacción. La mezcla M4 (10 % combustible auxiliar / 90 % tierras contaminadas) alcanzó las condiciones de autosostenibilidad del proceso, logrando una remoción de los extraíbles por n-hexano (indicador de contenido de hidrocarburos) del 95,23 %. Si bien la normativa uruguaya no establece límites específicos, el contenido final obtenido es suficientemente bajo como para permitir la reutilización del material tratado en el sitio.

Estos resultados confirman que la CL es un método eficaz y de bajo costo energético, y abre nuevas oportunidades para la innovación en el tratamiento de residuos peligrosos en Uruguay. No obstante, se reconoce que este estudio se realizó sobre un tipo específico de suelo (suelo orgánico) y un hidrocarburo particular (petróleo). Por ello, futuras investigaciones deberían ampliar la exploración a diferentes texturas y composiciones de suelo, así como a otros tipos de hidrocarburos, con el fin de evaluar la robustez del proceso y su aplicabilidad en un rango más amplio de escenarios reales.

AGRADECIMIENTOS

Santiago Lassus, Mirian E. Casco y Andrés Cuña agradecen a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) por la financiación de la maestría (POS_NAC_M_2020_1_164356). Los autores agradecen al Laboratorio de Medio Ambiente (LAMA) de ANCAP por el suministro de las muestras y la medida de los extraíbles por n-hexano.

REFERENCIAS

- Curto, P.; Pena, G.; Mantero, C.; Siri, G.; Tancredi, N.; Amaya, A.; Durante, A.; Ibañez, A.; Federico, E.; Lidio Braga, E. y Flores, M., 2017. *Cuantificación y evaluación del potencial energético de residuos agrarios y agroindustriales no tradicionales*. Montevideo: Udelar.
- Fu, J.; Zhang, S.; Ji, L.; Xu, X.; Jiao, W.; Chen, T.; Li, X. y Zhan, M., 2024. State of the art in self-sustaining smoldering for remediation of contaminated soil and disposal of organic waste. En: *Journal of Hazardous Materials*, 474, 134667. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2024.134667>
- International Organization for Standardization, 2010. ISO 562/2010(E): *Hard coal and coke - Determination of volatile matter*. - Ginebra: ISO.

- Kuppusamy, S.; Palanisami, T.; Megharaj, M.; Venkateswarlu, K. y Naidu, R., 2016. Ex-Situ remediation technologies for environmental pollutants: a critical perspective. En: *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 236, pp. 117–192. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-20013-2_2
- Pinedo, J.; Ibáñez, R.; Lijzen, J. P. A. e Irabien, Á., 2013. Assessment of soil pollution based on total petroleum hydrocarbons and individual oil substances. En: *Journal of Environmental Management*, 130, pp. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENVMAN.2013.08.048>
- Pironi, P.; Switzer, C.; Gerhard, J. I.; Rein, G. y Torero, J. L., 2011. Self-sustaining smoldering combustion for NAPL remediation: Laboratory evaluation of process sensitivity to key parameters. En: *Environmental Science and Technology*, 45(7), pp. 2980–2986. DOI: <https://doi.org/10.1021/ES102969Z>
- Rashwan, T. L.; Gerhard, J. I. y Grant, G. P., 2016. Application of self-sustaining smoldering combustion for the destruction of wastewater biosolids. En: *Waste Management*, 50, pp. 201–212. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2016.01.037>
- Rein, G.; Fernandez-Pello, A. C. y Urban, D. L., 2007. Computational model of forward and opposed smoldering combustion in microgravity. En: *Proceedings of the Combustion Institute*, 31(2), pp. 2677–2684. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.PROCI.2006.08.047>
- Santoso, M. A.; Christensen, E. G.; Yang, J. y Rein, G., 2019. Review of the transition from smoldering to flaming combustion in wildfires. En: *Frontiers in Mechanical Engineering*, 5, 456580. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmech.2019.00049>
- Shen, X.; Yan, H.; Shi, J.; Tan, Y.; Yang, H.; Hu, H. y Li, S., 2025. Experimental investigation on smoldering combustion for sewage sludge treatment: Influence of key parameters and self-sustaining limit. En: *Case Studies in Thermal Engineering*, 65, 105673. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2024.105673>
- Song, Z.; He, T.; Li, M.; Wu, D. y You, F., 2022. Self-sustaining smoldering as a novel disposal approach for food waste with high moisture content. En: *Fuel Processing Technology*, 228, 107144. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2021.107144>
- Switzer, C.; Pironi, P.; Gerhard, J. I.; Rein, G. y Torero, J. L., 2014. Volumetric scale-up of smoldering remediation of contaminated materials. En: *Journal of Hazardous Materials*, 268, pp. 51–60. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2013.11.053>
- Torero, J. L.; Gerhard, J. I.; Martins, M. F.; Zaroni, M. A. B.; Rashwan, T. L. y Brown, J. K., 2020. Processes defining smoldering combustion: Integrated review and synthesis. En: *Progress in Energy and Combustion Science*, 81, 100869. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2020.100869>
- Torres Brunengo, M.; Wyn, H. K.; Cuña, A.; Faccio, R.; Castiglioni, J. y Yermán, L., 2026. Self-sustained smoldering of low-calorific Uruguayan oil shales: influence of operational parameters and biomass addition. En: *Fuel*, 405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.136546>
- United States Environmental Protection Agency, 1998. [En línea]. *EPA methods*. Washington: EPA. Test Method 9071B. [Consulta: 18 de noviembre de 2015] Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/9071b.pdf>
- Uruguay. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, 2015. *Evaluación de impacto ambiental parques eólicos*. Montevideo: MVOTMA.

- Uruguay. Decreto 182/013, de 20 de junio de 2013. *Diario Oficial* [En línea], 27 de junio de 2013. [Consulta: 18 de noviembre de 2025]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/182-2013>
- Wyn, H. K.; Konarova, M.; Beltramini, J.; Perkins, G. y Yermán, L., 2020. Self-sustaining smouldering combustion of waste: A review on applications, key parameters and potential resource recovery. En: *Fuel Processing Technology*, 205, 106425. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2020.106425>
- Yermán, L., 2016. Self-sustaining Smouldering Combustion as a Waste Treatment Process. In *Developments in Combustion Technology*. En: *IntechOpen*. DOI: <https://doi.org/10.5772/64451>
- Yermán, L.; Cormier, D.; Fabris, I.; Carrascal, J.; Torero, J. L.; Gerhard, J. I. y Cheng, Y. L., 2017a. Potential bio-oil production from smouldering combustion of faeces. En: *Waste and Biomass Valorization*, 8(2), pp. 329–338. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-016-9586-1>
- Yermán, L.; Wall, H. y Torero, J. L., 2017b. Experimental investigation on the destruction rates of organic waste with high moisture content by means of self-sustained smouldering combustion. En: *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(3), pp. 4419–4426. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.07.052>