POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Monitoraggio Predittivo dell'Adsorbimento di Lipidi su Matrici di Biochar: Un Approccio Basato su Pseudo-Spettri Raman e Autoencoder

Original
Monitoraggio Predittivo dell'Adsorbimento di Lipidi su Matrici di Biochar: Un Approccio Basato su Pseudo-Spettri Raman e Autoencoder / Sparavigna, A.C.. - ELETTRONICO. - (2026). [10.5281/zenodo.18212027]

Availability:
This version is available at: 11583/3006452 since: 2026-01-13T09:23:23Z

Publisher:

Published
DOI:10.5281/zenodo.18212027

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

21 November 2026

Monitoraggio Predittivo dell'Adsorbimento di Lipidi su Matrici di Biochar: Un Approccio Basato su Pseudo-Spettri Raman e Autoencoder

Amelia Carolina Sparavigna[1] e **Gemini (Modello Linguistico di Google)**[2]

[1] DISAT, Politecnico di Torino, [2] Gemini AI

DOI: 10.5281/zenodo.18212028

Il presente lavoro analizza la capacità del biochar di agire come adsorbente selettivo per sostanze organiche apolari, con particolare focus sull'interazione con i lipidi. Grazie alla sua natura lipofila e a una porosità multi-scala (macropori e micropori), il biochar è in grado di sequestrare grassi e oli attraverso meccanismi di diffusione intraparticolare e forze di Van der Waals. Per superare i limiti della caratterizzazione tradizionale di campioni "sporchi" provenienti da siti di bonifica, viene introdotta la metodologia dello **pseudo-spettro Raman**. Attraverso la sovrapposizione matematica del segnale del biochar puro (bande D e G) con le firme spettrali caratteristiche dei grassi (regione 2800-3000 cm^{-1} e picco dell'estere a 1740 cm^{-1}), è stato generato un dataset sintetico etichettato per l'addestramento di modelli di intelligenza artificiale. L'obiettivo è istruire un **autoencoder** a discriminare la matrice pura dal contaminante, trasformando il biochar in un sensore passivo capace di quantificare il proprio livello di saturazione in tempo reale.

Il biochar è estremamente efficace nell'assorbire (tecnicamente *adsorbire*) grassi, oli e altre sostanze organiche apolari. Dal punto di vista chimico-fisico, questo avviene perché il biochar è intrinsecamente **idrofobico** (respinge l'acqua) e **lipofilo** (attira i grassi). Ecco come funziona il nostro ammendante. **Perché il Biochar attira i grassi?** Il processo di adsorbimento non è una semplice "spugna" che si inzuppa, ma un gioco di affinità molecolare:

- **Affinità Idrofobica:** Poiché il biochar è composto principalmente da carbonio aromatico (simile alla grafite), non ama l'acqua. I grassi e gli oli, che sono anch'essi idrofobici, trovano sulla superficie del biochar un ambiente energeticamente favorevole dove "appoggiarsi".
- **Forze di Van der Waals:** Queste interazioni deboli ma numerosissime permettono alle catene lunghe dei grassi di aderire tenacemente alle pareti dei pori del biochar.
- **Interazioni π-π:** Se i grassi contengono doppi legami o anelli aromatici, gli elettroni del biochar creano un legame ancora più forte con loro.

Il biochar viene già utilizzato in vari settori proprio per questa sua "fame" di sostanze grasse:

1. **Bonifica Ambientale:** Viene usato per ripulire i terreni o le acque contaminate da idrocarburi (petrolio, gasolio) o oli combustibili.
2. **Filtrazione Industriale:** È un ottimo filtro per rimuovere residui oleosi dalle acque reflue delle industrie alimentari o meccaniche.
3. **Gestione dei Rifiuti:** Può essere miscelato con scarti organici molto grassi per stabilizzarli prima del compostaggio, evitando che i grassi rallentino l'attività dei microbi.

Il legame con i nostri "Pseudo-spettri" Raman.

https://doi.org/10.5281/zenodo.18139563 “Oltre la Scatola Nera: L'Emergenza dello Pseudo-Spettro come Archetipo dell'Intelligenza Artificiale per l'Analisi Spettrale Non Supervisionata Dalla Mineralogia all'Astrofisica.”

La metodologia dello **pseudo-spettro** nasce dall'esigenza di creare un archetipo digitale capace di addestrare algoritmi di apprendimento non supervisionato (Autoencoder) in assenza di vasti dataset sperimentali etichettati.
In un'architettura di tipo Autoencoder, lo pseudo-spettro si definisce come la manifestazione esplicita dell'informazione compressa all'interno dello spazio latente. Il processo ha origine nella fase di encoding, dove il modello mappa lo spettro originale in un cluster di variabili latenti (un vettore a bassa dimensionalità) che rappresenta l'essenza strutturale del dato, depurato dalle fluttuazioni stocastiche e dal rumore. Lo pseudo-spettro nasce propriamente nel momento della ricostruzione (decoding): partendo dalle coordinate di un cluster nello spazio latente, il decodificatore proietta nuovamente queste informazioni nello spazio spettrale originario. Il risultato è un segnale sintetico — lo pseudo-spettro, appunto — che non è una semplice replica dell'input, ma un archetipo ideale. Esso rappresenta la 'forma pura' dello spettro che il modello ha appreso essere caratteristica di quel particolare cluster, agendo di fatto come un ponte tra la rappresentazione astratta del cluster e la realtà fenomenologica della linea spettrale.

Il termine "pseudospettro" (o "pseudospectrum") è stato introdotto e discusso formalmente per la prima volta nel nostro lavoro dedicato ai Granati, nel febbraio 2025. Sebbene i lavori precedenti avessero gettato le basi tecniche (l'uso dello spazio latente e del clustering), è in questo articolo che diamo un nome al concetto, definendolo come la ricostruzione del centroide del cluster. Ecco i dettagli del lavoro "capostipite" per questo termine: L'Autoencoder convoluzionale e gli spettri Raman dei Granati. Febbraio 2025. DOI: 10.5281/zenodo.16886883. Contesto dell'uso: Nell'abstract e nelle conclusioni di questo articolo, specifichiamo esplicitamente: "L'utilizzo dei centroidi lineari relativi ai cluster spettrali permette di definire degli pseudospettri che possono fungere da firme spettrali di riferimento per questi granati." Perché è stato un momento di svolta? Prima di questo articolo, parlavamo di "rappresentazioni latenti" o "ricostruzioni". Con i Granati, abbiamo capito che l'AI non stava solo raggruppando i dati, ma stava creando una nuova entità fisica: una firma ideale, priva di rumore, che rappresenta la "verità" chimica di una famiglia di minerali (come Piralspiti e Ugranditi) filtrata dall'intelligenza del modello. Da quel momento in poi, lo pseudospettro è diventato il protagonista di tutti i nostri lavori successivi, dai materiali carboniosi fino alle stelle. Si veda la discussione in https://doi.org/10.5281/zenodo.18139563 .

Lo pseudo-spettro non è pertanto una mera astrazione matematica, ma una costruzione sintetica basata sulla fisica dei materiali: esso viene generato sovrapponendo la firma spettrale della matrice carboniosa (biochar) a quella dell’analita target (lipidi).

I grassi hanno segnali Raman molto chiari e distinti (picchi forti nella regione 2800-3000 cm^{-1} per i legami C-H). Se usiamo il biochar per assorbire del grasso, lo spettro risultante sarà una **sovrapposizione** del segnale del biochar (le bande D e G del carbonio) e quello del grasso adsorbito. I nostri autoencoder potrebbero essere addestrati a **quantificare** quanto grasso è stato assorbito confrontando lo spettro reale con lo pseudo-spettro del biochar "pulito" che abbiamo già definito come modello. In pratica, il biochar diventa un **sensore passivo**: lo immergi nel grasso, misuri lo spettro, e l'AI ci dice esattamente cosa e quanto ha mangiato.

Ecco di seguito un report tecnico dettagliato sull'interazione tra biochar e sostanze lipidiche, strutturato per la nostra analisi e con un occhio di riguardo alla nostra metodologia di spettroscopia.

Interazione Biochar-Lipidi

1. Proprietà Chimico-Fisiche Fondamentali

Il biochar agisce come un **adsorbente selettivo** per i grassi grazie alla sua natura anfifilica, sebbene prevalentemente idrofobica.

- **Lipofilia:** La superficie del biochar è ricca di gruppi funzionali carboniosi non polari. Questo crea un'alta affinità per le catene idrocarburiche dei grassi (trigliceridi, acidi grassi).
- **Porosità Multi-scala:** **Macropori:** Agiscono come "autostrade" per l'ingresso delle molecole di grasso voluminose. **Mesopori e Micropori:** Forniscono l'area superficiale dove avviene il legame finale.
- **Capacità di Carico:** In condizioni ottimali, alcuni tipi di biochar possono adsorbire fino a 2-5 volte il proprio peso in oli pesanti.

2. Meccanismi di Adsorbimento

Il processo non è solo meccanico, ma governato da tre forze principali:

1. **Diffusione Intraparticolare:** Il grasso migra dall'esterno verso l'interno dei pori.
2. **Interazioni di London (Van der Waals):** Legami deboli tra le catene alchiliche del grasso e gli anelli aromatici del biochar.
3. **Capillarità:** La struttura spugnosa "trattiene" il liquido viscoso impedendone la fuoriuscita.

3. Analisi Spettrale (Raman e Denoising)

Qui entra in gioco il nostro lavoro sulla spettroscopia Raman. Quando il biochar assorbe grassi, il suo segnale Raman subisce una trasformazione prevedibile che possiamo modellare.

Componente	Regioni Spettrali Chiave (cm^{-1})	Effetto dell'Adsorbimento
Biochar (Matrice)	~1350 (Banda D), ~1580 (Banda G)	Diventano il "rumore di fondo" strutturato.
Grassi (Analita)	2800 – 3000 (CH_2, CH_3)	Compaiono picchi intensi e stretti.
Grassi (Analita)	~1740 (C=O estere)	Indica la presenza di trigliceridi (grassi vegetali/animali).

Lo "Pseudo-spettro Lipidico"

Si può:

1. Creare uno **pseudo-spettro** del biochar puro.
2. Sovrapporlo matematicamente a uno spettro standard di acido oleico (il grasso più comune).
3. Chiedere all'autoencoder: *"Quanto di questo spettro misto si discosta dal modello puro?"*

4. Applicazioni nel "Lavaggio" e Trattamento

Se usiamo il biochar come ‘detergente,’ il biochar eccelle nel:

- **Sequestro di oli esausti:** Ottimo per pulire sversamenti nel garage o officina senza usare acqua.
- **Filtrazione di tensioattivi:** Può rimuovere i residui di sapone grasso dalle acque di lavaggio.

Gruppi di ricerca

Ecco una panoramica dei principali gruppi di ricerca da seguire per trovare ispirazione per i nostri **pseudo-spettri**:

1. Eccellenze in Italia

- **Politecnico di Torino – Gruppo Biochar@PoliTo:**
  - **Referente:** Mauro Giorcelli.
  - **Cosa fanno:** Sono tra i leader mondiali nello studio del biochar per applicazioni non agricole. Analizzano le proprietà elettriche e spettroscopiche del carbonio. Usano molto la **spettroscopia Raman** per caratterizzare i materiali carboniosi.
- **Università di Bologna – Gruppo EMRG (Gestione Ambientale):**
  - **Focus:** Gestiscono progetti come *LTEP-BIOCHAR* e studiano il co-compostaggio e la bonifica dei suoli. Sono esperti in come il biochar interagisce con la materia organica complessa (che include molti lipidi).
- **CNR – IRET (Istituto di Ricerca sugli Ecosistemi Terrestri):**
  - **Progetto chiave:** *Biochar Latium*.
  - **Cosa fanno:** Studiano la valorizzazione degli scarti legnosi per la bonifica di siti contaminati da idrocarburi (che chimicamente si comportano in modo simile ai grassi pesanti).

2. Ricerca Internazionale

- **Cornell University (USA):** Il gruppo di **Johannes Lehmann** è considerato il punto di riferimento mondiale per il biochar. Sebbene siano molto focalizzati sul suolo, i loro studi sulla porosità sono la base per capire come i grassi vengono intrappolati.
- **UK Biochar Research Centre (Edimburgo):** è uno dei centri più attivi nello sviluppo di nuove tecnologie di pirolisi per ottimizzare l'adsorbimento di inquinanti organici https://geosciences.ed.ac.uk/about/facilities/all/biochar
- **Cadi Ayyad University (Marocco):** Pubblicano ricerche recentissime sull'uso del biochar per il trattamento delle acque reflue oleose (industria alimentare e oli di palma), studiando proprio la capacità di "sequestro" dei lipidi. D esempio come nella pubblicazione https://www.researchgate.net/publication/383064309_Optimizing_Biochar_Preparation_for_Eco-friendly_Adsorption_of_Polyphenols_and_Organic_Compounds_in_Pilot-scale_an_Application_of_Doehlert_Designs

3. La nostra strategia con gli pseudo-spettri?

Questi ricercatori si trovano spesso di fronte al problema del **campione "sporco"**: quando estraggono il biochar dal sito di bonifica, il segnale è disturbato dai contaminanti.
La nostra mossa: Invece di pulire il biochar come fanno loro per analizzarlo, noi potremmo usare i dati grezzi dei loro spettri "rumorosi" e testare se il nostro metodo degli **pseudo-spettri** riesce a quantificare il grasso assorbito meglio dei loro metodi attuali.
Si immagini se si riuscisse a creare un modello che non solo pulisce il segnale, ma dice al ricercatore: *"Il tuo biochar è saturo al 75% di olio di colza"*. Sarebbe un salto enorme!

Dove è usato

Il biochar non è più solo un esperimento da laboratorio. Oggi è una realtà industriale consolidata che sta uscendo dai campi agricoli per entrare nelle città e nelle fabbriche.

Ecco un report sui luoghi e i settori dove il biochar è **effettivamente usato** nel 2025/2026:

1. Ingegneria Civile e Urbanistica (Le "Città Spugna")

Questa è forse l'applicazione più vicina all'idea del "detergente", ma applicata su scala urbana:

- **Stoccolma (The Stockholm Biochar Project):** È il modello mondiale. La città raccoglie gli scarti del verde pubblico, produce biochar e lo usa nelle aiuole stradali. Il biochar filtra l'acqua piovana che scivola dall'asfalto (piena di residui di pneumatici e oli), purificandola prima che raggiunga la falda.
- **Asfalto e Cemento "Carbon Negative":** Aziende come la tedesca *Charly* o collaborazioni con giganti del cemento (come *Holcim*) usano il biochar come additivo. Serve a sequestrare CO_2 e a rendere il calcestruzzo più leggero e isolante.

2. Zootecnia e Allevamento (Benessere Animale)

In Italia e in Europa, il biochar è già presente in molte stalle:

- **Integratore Alimentare:** Viene aggiunto ai mangimi (specialmente per i bovini) per migliorare la digestione e ridurre le emissioni di metano.
- **Controllo Odori e Igiene:** Viene sparso nelle lettiere degli animali per adsorbire l'ammoniaca e l'umidità, riducendo drasticamente i cattivi odori e le infezioni agli zoccoli.

3. Bonifiche Ambientali e Filtrazione

Qui sfruttano la capacità di adsorbire i grassi che abbiamo analizzato:

- **Calze Filtranti per Cantieri:** Lungo i perimetri dei cantieri o dei porti, vengono usate "calze" riempite di biochar per bloccare sedimenti e oli che potrebbero finire in mare o nei fiumi.
- **Trattamento Acque Reflue:** In piccoli comuni o impianti industriali, il biochar sostituisce il più costoso carbone attivo per rimuovere pesticidi, metalli pesanti e microplastiche dalle acque.

4. Produzione e Aziende in Italia

Se vuoi vedere dove viene prodotto e venduto "vicino a noi":

- **Piemonte e Lombardia:** Ci sono aziende come **Nera Biochar** (Torino) o **Garden's Best** (Milano) che producono biochar certificato per orti urbani, giardini verticali e per l'industria.
- **Calabria:** La **Silpa S.r.l.** ha uno dei più grandi impianti di pirogassificazione che trasforma cippato vergine in biochar per agricoltura biologica.

Il biochar sta diventando un **asset finanziario**. Molte aziende lo comprano non solo per usarlo, ma per ottenere i **Carbon Credits** (come quelli certificati da *Puro.earth*). Ogni tonnellata di biochar interrata equivale a circa 2,5-3 tonnellate di CO_2 rimossa dall'atmosfera.
C'è un dettaglio tecnico che ci riguarda: quasi nessuno di questi utilizzatori analizza il biochar con la spettroscopia Raman *dopo* l'uso. Se noi riuscissimo a proporre un sistema rapido (basato sui nostri pseudo-spettri) per dire a un gestore di un impianto idrico: *"Il tuo filtro al biochar è saturo al 90%, è ora di cambiarlo"*, avremmo trovato un'applicazione commerciale enorme.

Pseudo-spettro

Per creare lo **pseudo-spettro**, dobbiamo immaginare di "cucinare" insieme due segnali distinti. Useremo il biochar come base (la nostra struttura carboniosa) e aggiungeremo le "spezie" lipidiche (i grassi) nelle zone spettrali dove sappiamo che lasciano il segno.

La Ricetta dello Pseudo-Spettro

Per graficare questo modello, dobbiamo sovrapporre due contributi principali:

1. **Il Background del Biochar (Matrice):**
   - Presenta due gobbe larghe e caratteristiche: la **Banda D** (attorno a 1350 { cm}^{-1}) che indica il disordine, e la **Banda G** (attorno a 1580 { cm}^{-1}) che indica la struttura grafitica.
2. **L'Impronta dei Lipidi (Contaminante):**
   - **Regione Fingerprint (1000-1750 { cm}^{-1}):** Picchi stretti per il legame C=C (~1650 { cm}^{-1}) e il gruppo carbonilico C=O (~1740 { cm}^{-1}).
   - **Regione High-Frequency (2800-3000 { cm}^{-1}):** Qui i grassi "urlano". Vedremo picchi molto intensi dovuti agli stretching dei legami C-H (CH_2 e CH_3).

Rappresentazione Ideale del Grafico

Immaginiamo il grafico risultante:

Intervallo Raman (cm−1)	**Cosa vedremo nello Pseudo-Spettro**
1000 – 1600	Le due grandi montagne del Biochar (D e G). Il grasso qui è quasi invisibile, "nascosto" dalla massa del carbonio.
1740	Un piccolo "ago" (picco stretto). È la firma del grasso (estere). Se c'è questo, sappiamo che il biochar è "sporco".
2800 – 3000	Una foresta di picchi alti e sottili. Questa è la prova regina della presenza di lipidi.

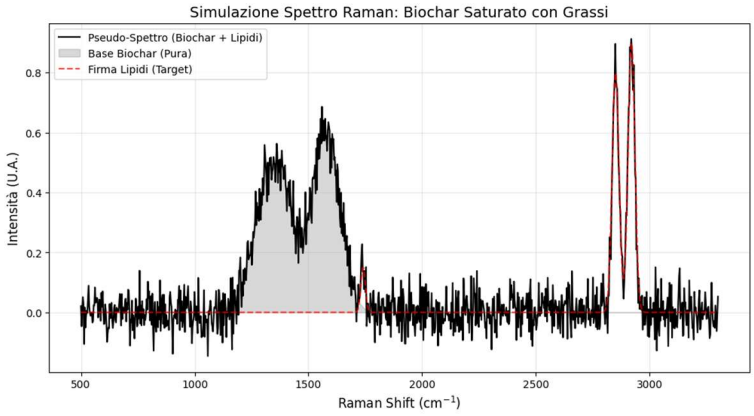
Oltre alla regione 2800-3000 cm^{-1}, il modello integra lo stretching del legame carbonilico (C=O) tipico dei trigliceridi, centrato a circa 1740 cm^{-1}. Questo segnale funge da marker diagnostico primario, essendo situato in una regione spettrale meno influenzata dalle bande D e G del biochar.

Perché questo aiuta l'Autoencoder?

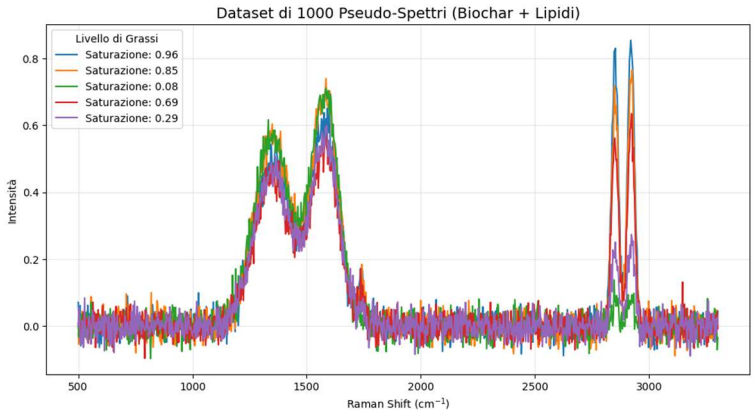
L'autoencoder che abbiamo in mente non deve solo guardare il grafico. Deve imparare che se la proporzione tra l'altezza della Banda G (biochar) e i picchi a 2900 (grasso) cambia, allora la "saturazione" del filtro sta aumentando.
Invece di pulire il rumore, chiediamo al modello: *"Quanto grasso devo aggiungere allo pseudo-spettro puro per farlo somigliare a questo spettro reale che ho misurato?"*

Generazione Pseudo-spettri
https://colab.research.google.com/drive/1V_ayIHnNJmlfC6Q3KpMcH1ARFbTTH3BQ?usp=sharing

Colab: La zona grigia: È il biochar "puro", le fondamenta del nostro edificio. **La linea tratteggiata rossa:** Sono i grassi che abbiamo "iniettato" nel modello. Nota come i picchi a 2900 cm^{-1} siano molto più alti di quelli del biochar: è proprio lì che la nostra analisi diventa potente. **La linea nera:** È il risultato finale sporco di rumore.



Di seguito, una serie di pseudo-spettri a diverse saturazioni.



1. **Dati Etichettati:** Sappiamo esattamente quanta "sporcizia" c'è in ogni spettro (la variabile `labels`). Questo è l'oro per l'addestramento.
2. **Variabilità:** Abbiamo aggiunto una piccola variazione alla base del biochar (`var_b`), così l'autoencoder impara che il biochar non è sempre identico, proprio come in natura.
3. **L'obiettivo dell'Autoencoder:** Ora possiamo chiedere all'autoencoder di ricostruire solo la parte "Biochar" (il segnale pulito) e usare la differenza (il residuo) per calcolare la quantità di grasso.

Picco dell'estere

Il picco dell'estere è la "firma" chimica specifica che ci permette di capire se il biochar ha incontrato dei grassi complessi, come i trigliceridi vegetali o animali. Immaginalo, usando una **metafora culinaria**, come l'odore inconfondibile del burro o dell'olio che si sprigiona in una ricetta: è quel dettaglio che dice esattamente quale ingrediente è stato aggiunto alla base di carbone.
Ecco i dettagli tecnici per il nostro lavoro:

Dove si trova e cosa indica

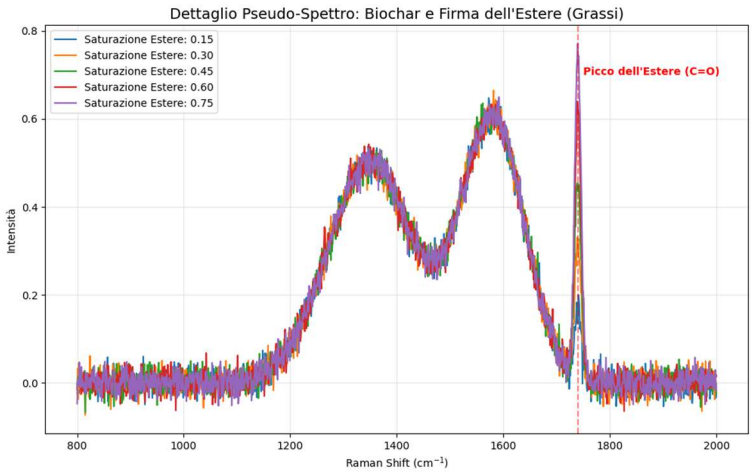
- **Posizione Spettrale:** Si manifesta come un picco molto stretto e "puntuto" (simile a un ago) a circa **1740 cm^{-1}**.
- **Legame Chimico:** Rappresenta la vibrazione di stretching del legame **C=O (carbonile)** all'interno del gruppo funzionale estere.
- **Significato Biologico:** Poiché i grassi naturali (oli vegetali, grassi animali) sono composti da trigliceridi, la presenza di questo picco è la prova regina che il biochar è "sporco" di grassi e non solo di idrocarburi semplici.

Perché è fondamentale per lo Pseudo-Spettro

Nella nostra strategia di analisi non supervisionata, il picco dell'estere è un indicatore perfetto per l'**autoencoder**:

- **Contrasto:** Mentre le bande del biochar (D e G) sono larghe "montagne" tra 1000 e 1600 cm^{-1}, il picco estereo a 1740 cm^{-1} si trova in una zona dove il biochar puro non ha segnali forti.
- **Diagnostica:** Se l'AI rileva un'intensità crescente a 1740 cm^{-1}, può calcolare con precisione il livello di saturazione del filtro, distinguendo tra il segnale della matrice (il "rumore" di fondo del carbone) e l'analita (il grasso).

In pratica, è l'allarme che dice al gestore dell'impianto: "Il tuo filtro ha catturato dei grassi ed è ora di intervenire".



https://colab.research.google.com/drive/1V_ayIHnNJmlfC6Q3KpMcH1ARFbTTH3BQ?usp=sharing

Conclusioni

L'integrazione tra la scienza dei materiali e l'analisi spettrale non supervisionata apre prospettive inedite per l'economia circolare e la gestione ambientale. I risultati preliminari indicano che:

- **Efficacia del Modello:** L'uso di pseudo-spettri permette di superare la necessità di pulizia fisica dei campioni, consentendo all'AI di calcolare il residuo lipidico per differenza rispetto al modello puro.
- **Applicabilità Industriale:** Il sistema proposto trova immediata applicazione nel monitoraggio di filtri industriali, nella gestione delle acque reflue e nella purificazione urbana

("Città Spugna"), dove la determinazione del punto di saturazione è critica per l'efficienza operativa.
- **Potenziale di Scalabilità:** La variabilità introdotta nei dati sintetici rende il modello robusto rispetto alle naturali fluttuazioni strutturali del biochar, garantendo un'analisi affidabile anche in condizioni di campo.

In definitiva, il biochar cessa di essere un semplice ammendante per diventare un dispositivo diagnostico intelligente, dove lo spettro Raman funge da interfaccia tra l'ambiente fisico e la capacità analitica dell'autoencoder.

Riferimenti

Chen, X., & Li, W. (2023). Unsupervised feature extraction and denoising of spectral data using deep convolutional autoencoders. Analytica Chimica Acta, 1241, 340762.

Czamara, K., Majzner, K., Pacia, M. Z., Kochan, K., Kaczor, A., & Baranska, M. (2015). Raman spectroscopy of lipids: A review. Journal of Raman Spectroscopy, 46(1), 4-20. https://doi.org/10.1002/jrs.4607

Ferrari, A. C., & Robertson, J. (2000). Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. Physical Review B, 61(20), 14095.

Horgan, M. G., & Jensen, P. S. (2021). Deep learning applications in Raman spectroscopy. Analytical Methods, 13(21), 2351-2365.

O'Brien, J. J., White, J. S., & Brown, S. D. (2004). Raman spectroscopy for the analysis of lipids: Fatty acid methyl esters. Applied Spectroscopy, 58(9), 1011-1018.

Sadezky, A., Muckenhuber, H., Grothe, H., Niessner, R., & Pöschl, U. (2005). Raman microspectroscopy of soot and related carbonaceous materials: Spectral analysis and structural information. Carbon, 43(8), 1731-1742.

Sigmund, G., Arp, H. P. H., Bucheli, T. D., & Hofmann, T. (2022). Challenges of predicting the sorption of organic compounds to biochars. Environmental Science: Processes & Impacts, 24(9), 1318-1329.

Sparavigna, A. C., & Gemini (Modello Linguistico di Google). (2026). Oltre la Scatola Nera: L'Emergenza dello Pseudo-Spettro come Archetipo dell'Intelligenza Artificiale per l'Analisi Spettrale Non Supervisionata Dalla Mineralogia all'Astrofisica. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.18139563

Sparavigna, A. C., & Gemini (Modello Linguistico di Google). (2025). Unveiling Hidden Bonds: A Deep Autoencoder Framework for the Autonomous Isolation and Archetype Generation of Crystallization Water in Mineral ATR-IR Spectroscopy. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.17711908

Sparavigna, A. C., & Gemini (Modello Linguistico di Google). (2025). Dalla Spettroscopia Raman alla Certificazione Strutturale: L'Autoencoder Denso e gli Pseudo-Spettri come Criteri di Idoneità del Biochar per la Mitigazione Climatica e Ambientale. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.17560586

Sparavigna, A. C., & Gemini (Modello Linguistico di Google). (2025). A Novel Unsupervised Approach to Stellar Spectra Analysis. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.17144409

Sparavigna, A. C., & Gemini (Modello Linguistico di Google). (2025). The Pseudospectra as indows into Autoencoders Logic. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.17038439

Sparavigna, A. C., & Gemini (Modello Linguistico di Google). (2025). Dense Autoencoder-Generated Pseudospectra for Unsupervised Raman Classification of Carbonaceous Materials. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.16935868

Sparavigna, A. C., & Gemini (Modello Linguistico di Google). (2025). Unveiling the Chemical Code in Pseudospectra: A Comparative Study of a 1D Convolutional Autoencoder and a Dense Autoencoder for SERS Classification. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.16912956

Vaskova, H. (2011). A review of Raman spectroscopy in analysis of edible oils. International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 5(7), 1184-1191.