SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE COMPOSITOS SILICE-MAGNETITA (GMS-NX-FE) Y SU USO EN LA REMOCIÓN DE ORO EN SISTEMAS ACUOSOS

Diego Martínez Torres[1], Carmen Salazar Hernández[2], Enrique Elorza Rodríguez[1], Mario Alberto Corona Arroyo[1], Juan Manuel Mendoza Miranda[2] Raúl Miranda Áviles[1] y Ma. Mercedes Salazar Hernández[1*]

[1]Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología
Universidad de Guanajuato
[2]UPIIG-IPN
merce@ugto.mx

Noviembre 2025

CONTENIDO

Introducción

Casos de Estudio:

1. Adsorción de Au(III)

Objetivos
Resultados

Conclusiones

Agradecimientos

INTRODUCCIÓN

Universidad de Guanajuato

Los procesos hidrometalúrgicos para la recuperación de los metales ya sea de sus mena o de algún proceso de reciclaje, involucran 4 grandes etapas [1]:

Preparación

- Reducción de tamaño de la partícula
- Pre-concentración

Lixiviación

- Lixiviación química (CN^-; $S_2O_3^{2-}$, agua regia)
- Biolixiviación
- Lixiviación bajo presión

Recuperación del Au/Ag del lixiviado

- Precipitación-Cementación
- Adsorción
- Electro-depósito

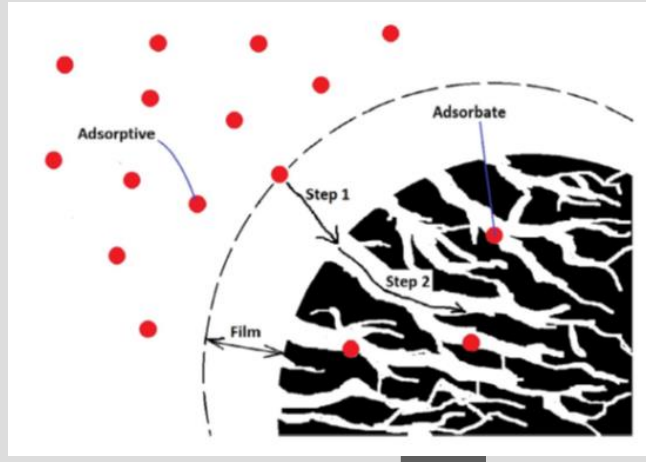
Refinación

- Electro-química
- Fundición

[1] Syed S. "Silver recovery aqueous techniques from diverse source: hydrometallurgy in recycling" Waste Management (2016) 50: 234-256.

INTRODUCCIÓN

Universidad de Guanajuato



La adsorción presenta grandes ventajas y algunas desventajas. La manipulación de las columnas de adsorción y desorción puede ser complicado dependiendo de la naturaleza del adsorbente.

Proceso	Descripción	Ventajas	Limitantes
Adsorción [2]	Atrapa al sorbato a través de interacciones físicas o químicas. Los sorbentes son filtrados y regenerados para n procesos	✓ Amplio variedad de adsorbentes ✓ **Bajo costo** ✓ Fácil uso	χ Tiempo y consumo de pos-tratamiento χ Capacidad máxima de adsorción χ Materiales híbridos

[2] Ethaib, S.; Al-Qutaifia, S.; Al-Ansari, N.; Zubaidi, S.L. Function of Nanomaterials in Removing Heavy Metals for Water and Wastewater Remediation: A Review. *Environments 2022, 9, 123*.https://doi.org/10.3390/environments9100123

INTRODUCCIÓN

Universidad de Guanajuato

Un ejemplo de las problemáticas que presentan los proceso de adsorción en la industria, se muestra en la recuperación del Au de las soluciones ricas de cianuración con carbón activado, en donde el proceso muestra:

VENTAJAS

- ✓ **PROCESO MUY SIMPLE**
- ✓ **ADSORBENTE MUY ECONÓMICO**

DESVENTAJAS

- ✓ **ADSORBENTE NO SELECTIVO**
- ✓ **LA GENERACIÓN DE FINOS EN LAS CRIBAS DE RECUPERACIÓN[3]**

a) **IAMGOLG's Essakane en Burkina Faso, ha reportado una formación de finos al mes de 23.5 ton que corresponden a una pérdida de 1938 g/ton de plata mensuales.**

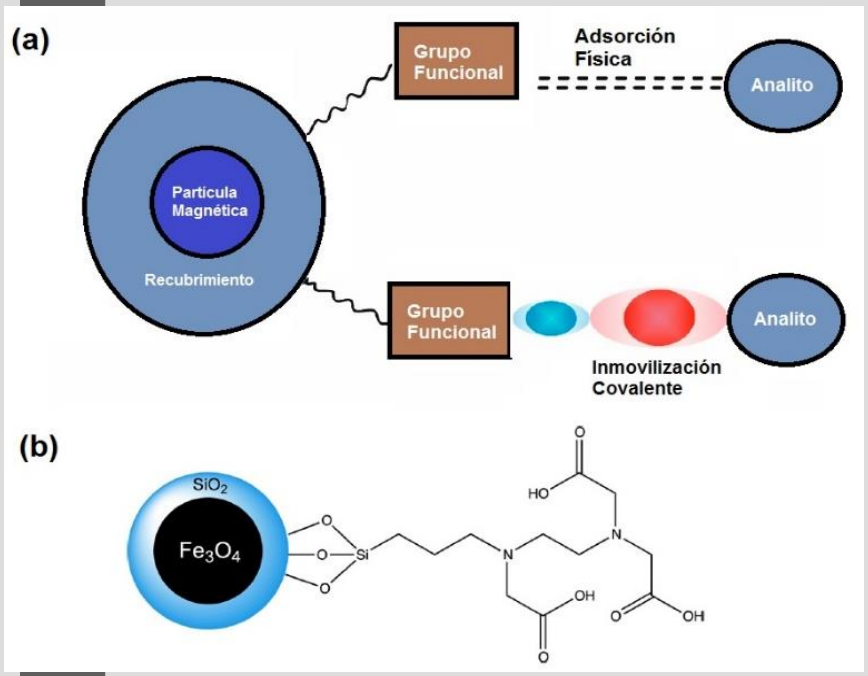
b) **Pinos Altos México se ha reportado hasta 180 ton/mes**

[3] a) Vuuren, C. P. J. V., C. P. Snyman, et al.. "Gold Losses from Cyanide Solutions Part II: The Influence of the Carbonaceous materials Present in the Shale Material." *Minerals Engineering* (2000) **13**(10-11): 1177-1181

(b) Engineering, P. (2014). Proyecto Mascota Evaluación de Planta ADR y Laboratorio Metalúrgico. Chihuahua, Chihuahua, Agnico Eagle México S.A. de C.V.: 31

INTRODUCCIÓN

Universidad de Guanajuato



Una alternativa, podrían ser los adsorbentes magnéticos en base a sílice-magnetita, que:

1) Ofrecer una mayor selectividad en función a la funcionalización de la sílice
2) Se eliminan las columnas de adsorción-desorción por la concentración magnética, lo que elimina la perdida de adsorbente cargado.

Estos sistemas se han evaluado en procesos hidrometalúrgicos para la recuperación magnética de: Au, Ag, Pd, Pt (ácidos) [1,4-6]

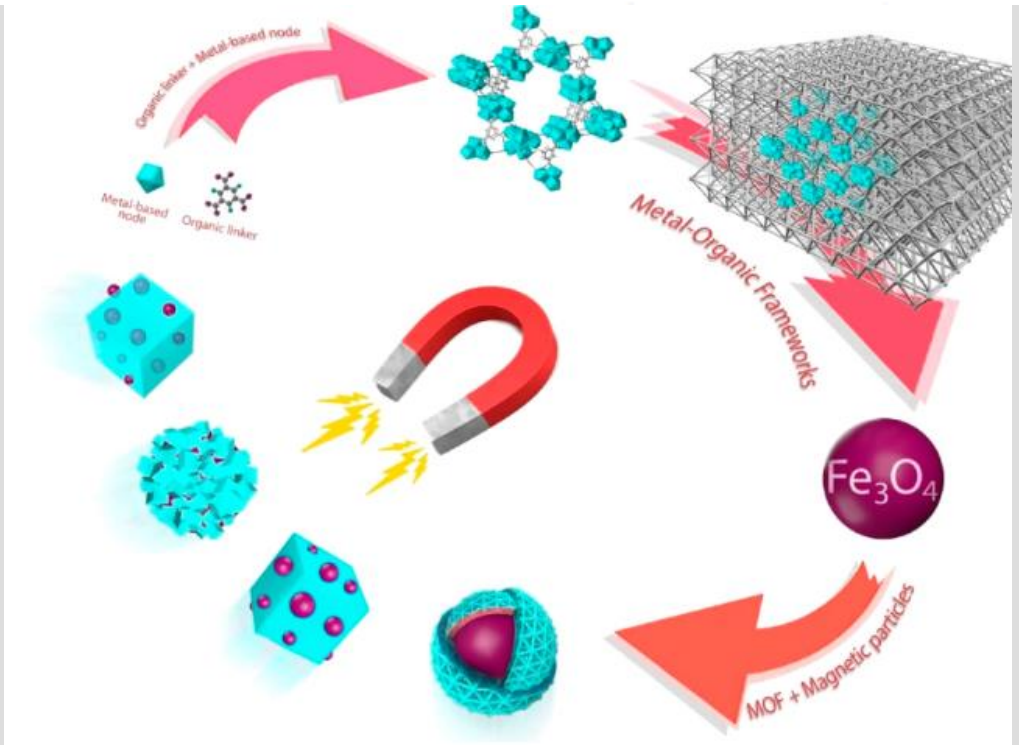
[4] Qi Meng, Xiaohui Yan, Guichun Li,"Eco-friendly and reagent recyclable gold extraction by iodination leaching-electrodeposition recovery" *Journal of Cleaner Production* **(2021)** 323: 129115. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129115.

[5] Jiyang Liu, Zheng Deng, Haojie Yu, Li Wang "Ferrocene-based metal-organic framework for highly efficient recovery of gold from WEEE" *Chemical Engineering Journal* **(2021)** 410: 128360. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128360.

[6]Jiling Zhao, Chen Wang, Shixing Wang, Libo Zhang, Bing Zhang, "Selective recovery of Au(III) from wastewater by a recyclable magnetic $Ni_{0.6}Fe_{2.4}O_4$ nanoparticels with mercaptothiadiazole: Interaction models and adsorption mechanisms" *Journal of Cleaner Production* **(2019)** 236: 117605. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117605.

Table 1. Synthesized MMOFs Used in the Removal of Hg^{2+}

MOF	MOF component	Modifying ligand	Target ion(s)	Adsorption capacity (mg g^{-1})	Optimal condition
MIL101(Fe)	Fe^{3+}, H_2BDC	DMcT	Hg^{2+}	185	pH 6.25, 14 min
HKUST-1	Cu^{2+}, H_3BTC	DTIM	Hg^{2+}	254	pH 6, 8 min
TMU-32	Zn^{2+}, H_2OBA, DPU		Hg^{2+}	905	pH 7, 30 min
UiO-66	Zr^{4+}, 2,5-dimercaptoterephthalic	CeO_2	Hg^{2+}	~100	pH 5, 3 h



Reza Taghavi, Sadegh Rostamnia, Mustafa Farajzadeh, Hassan Karimi-Maleh, Jinghan Wang, Dokyoon Kim, Ho Won Jang, Rafael Luque, Rajender S. Varma, and Mohammadreza Shokouhimehr "Magnetite Metal-Organic Frameworks: Applications in Environmental Remediation of Heavy Metals, Organic Contaminants, and Other Pollutants" Inorg. Chem. 2022, 61, 15747-15783

Universidad de Guanajuato

HIPÓTESIS

La modificación de sílices amino funcionalizadas con magnetita, le proporcionará a la sílice las propiedades magnéticas necesarias para su potencial concentración magnética, su vez los grupos amino presentes en la sílica favorecerán la capacidad de adsorción de iónes metálicos como Au(III).

OBJETIVO GENERAL

Sintetizar y caracterizar silicas mesoporosas amino funcionalizadas con 1, 2 o 3 grupos amino y su modificación con Fe_3O_4, así como evaluar su capacidad de adsorción frente a Au(III) en sistemas H_2O/HCl

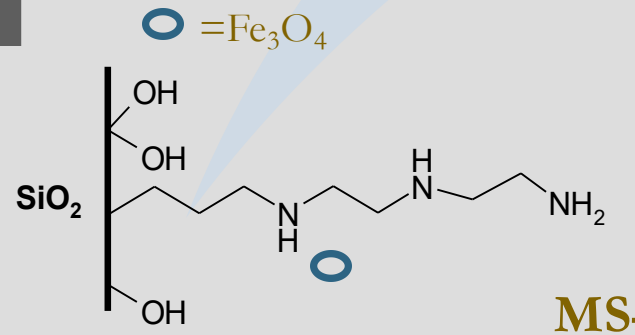
EXPERIMENTACIÓN

Universidad de Guanajuato

Estudios de Adsorción de Au(III) en soluciones sintéticas

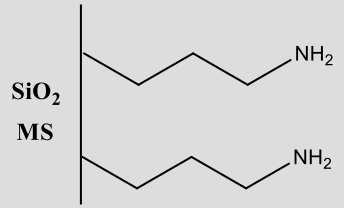
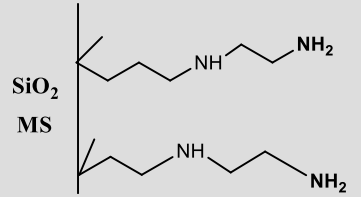
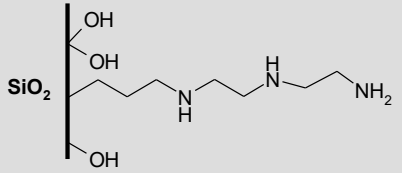
Preparación de una solución sintética de $[AuCl_4]^-$

Síntesis y Caracterización de las GMS-Nx-Fe mediante precursores de bajo costo



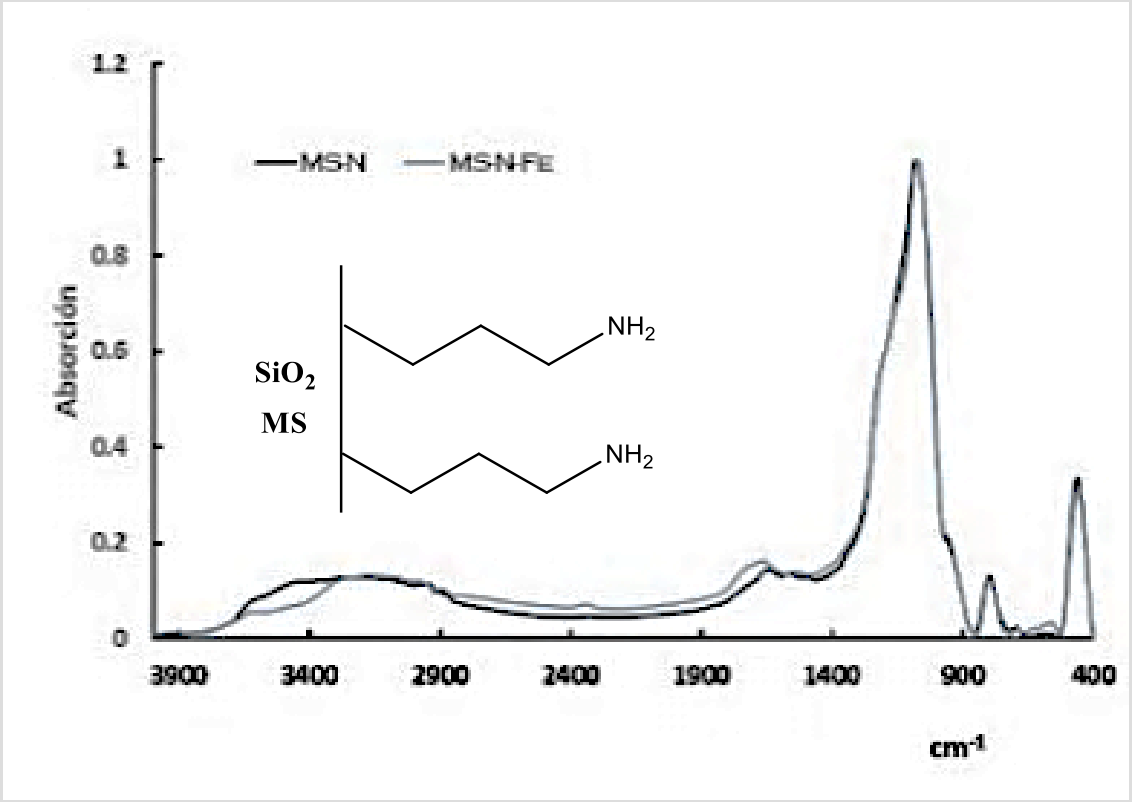
MS-N_3-Fe

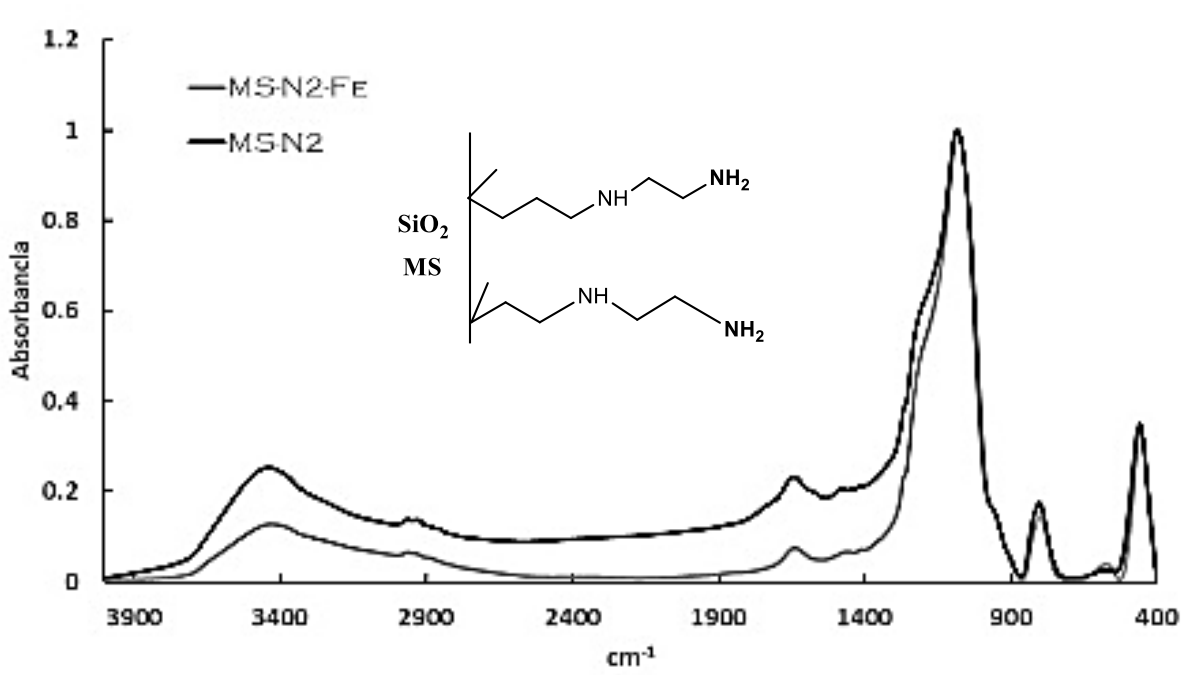
I.-Síntesis

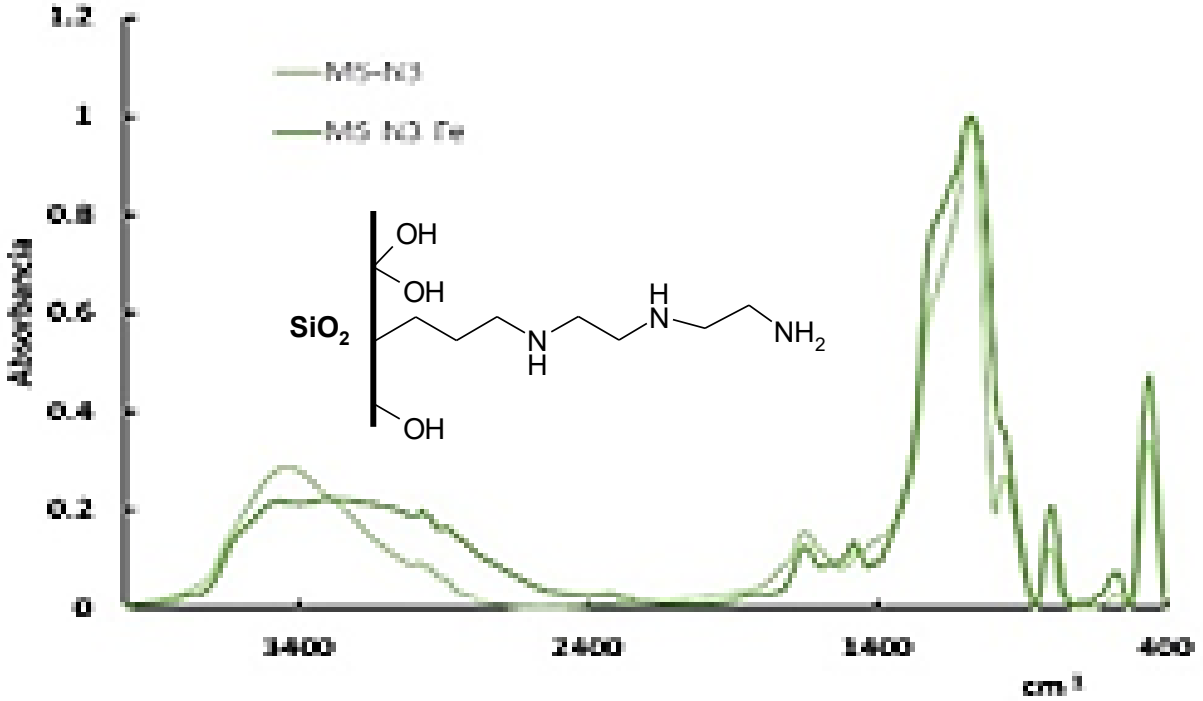
Material	Precursores	Estructura
GMS-N-Fe	3-aminopropiltrimetoxisilano	
GMS-N_2-Fe	3-(diaminopropil)metildimetoxisilano	
GMS-N_3-Fe	N^1-(3-trimetóxisililpropil)dietilenamina	

II. CARACTERIZACIÓN

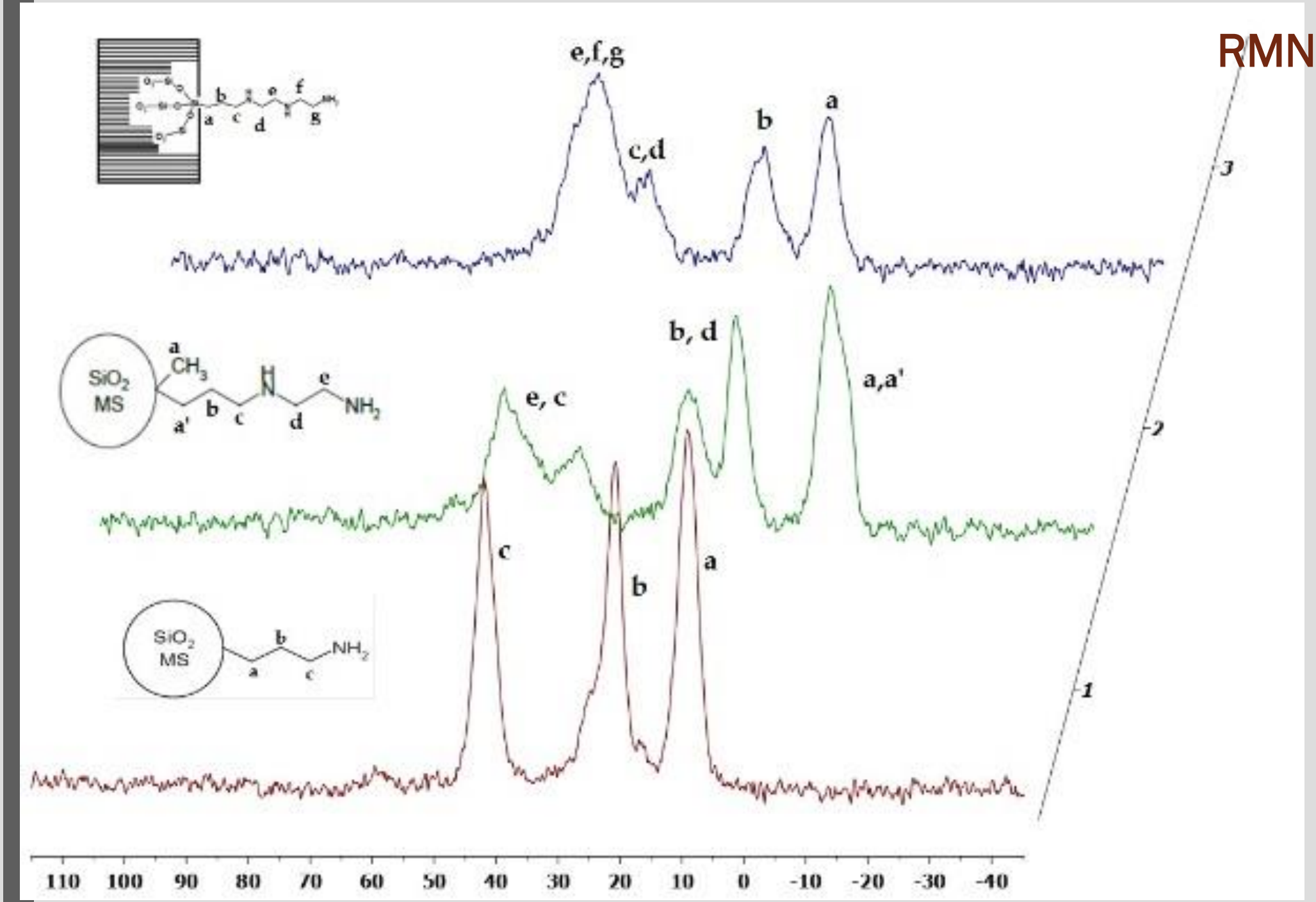
FTIR



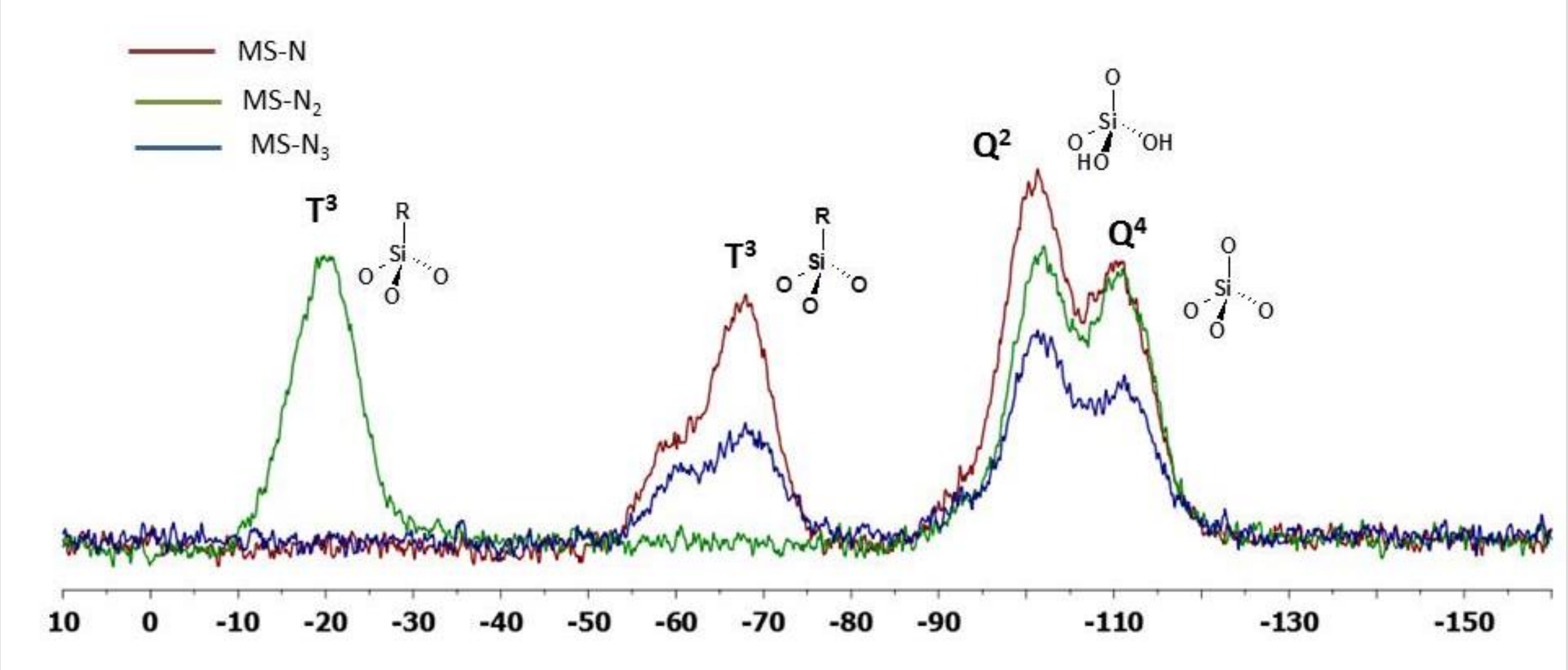




RMN CP-MAS ^{13}C

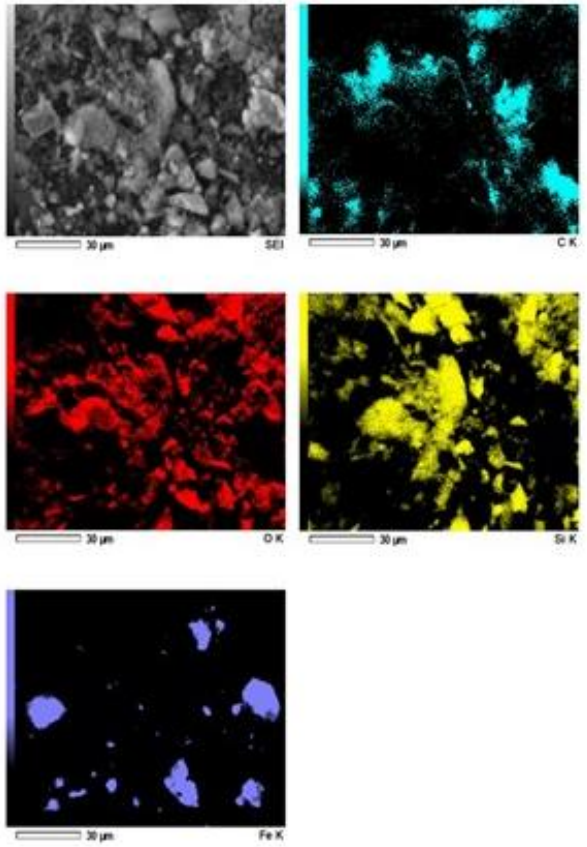


RMN CP-MAS ^{29}Si

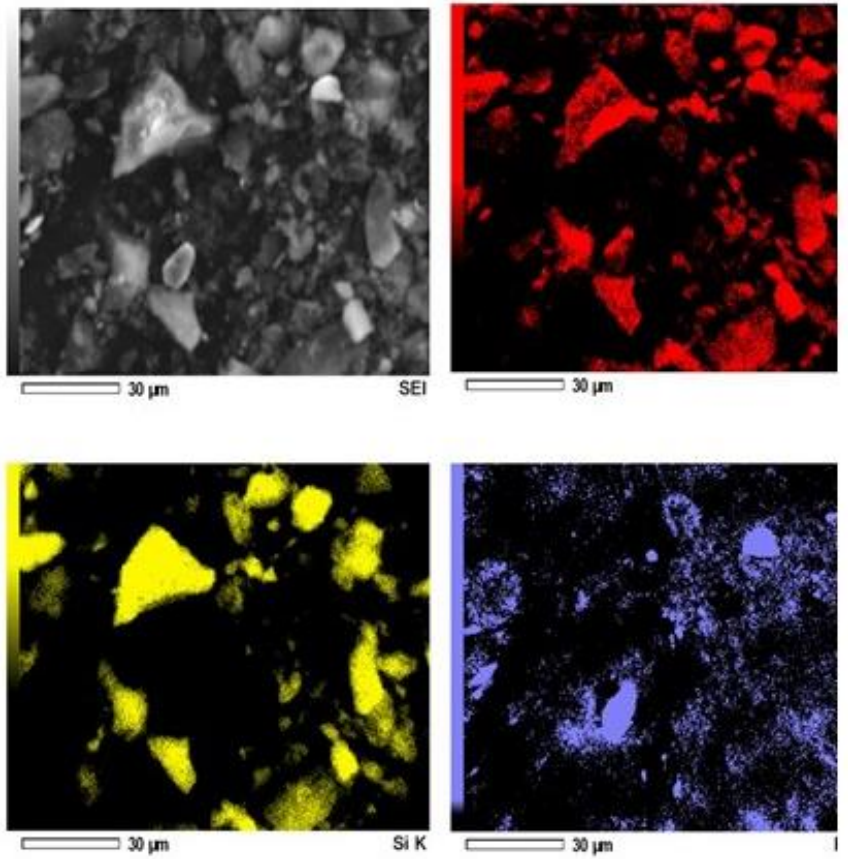


SEM-EDS

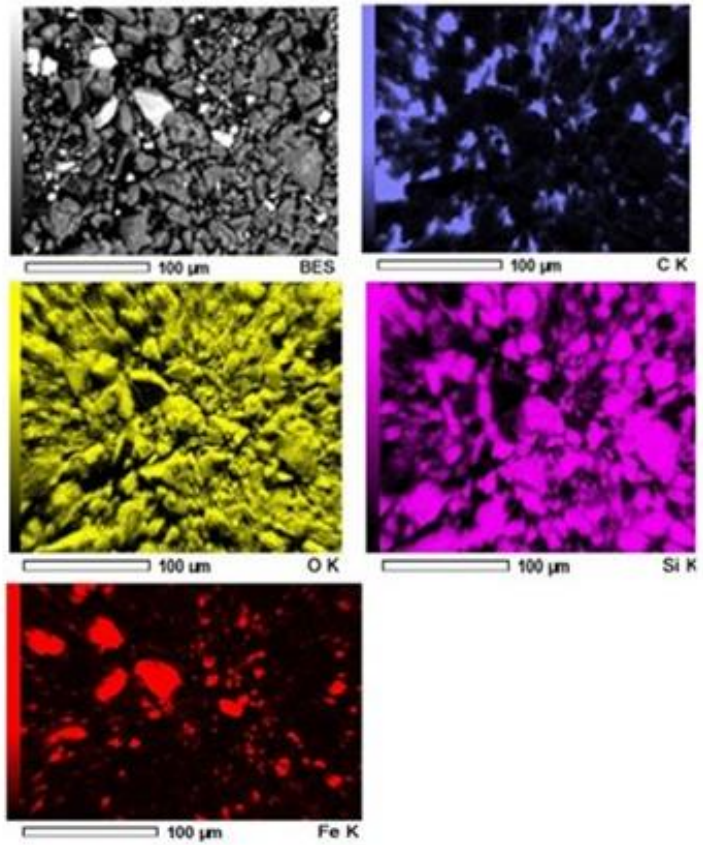
$MS\text{-}N\text{-}Fe_3O_4$



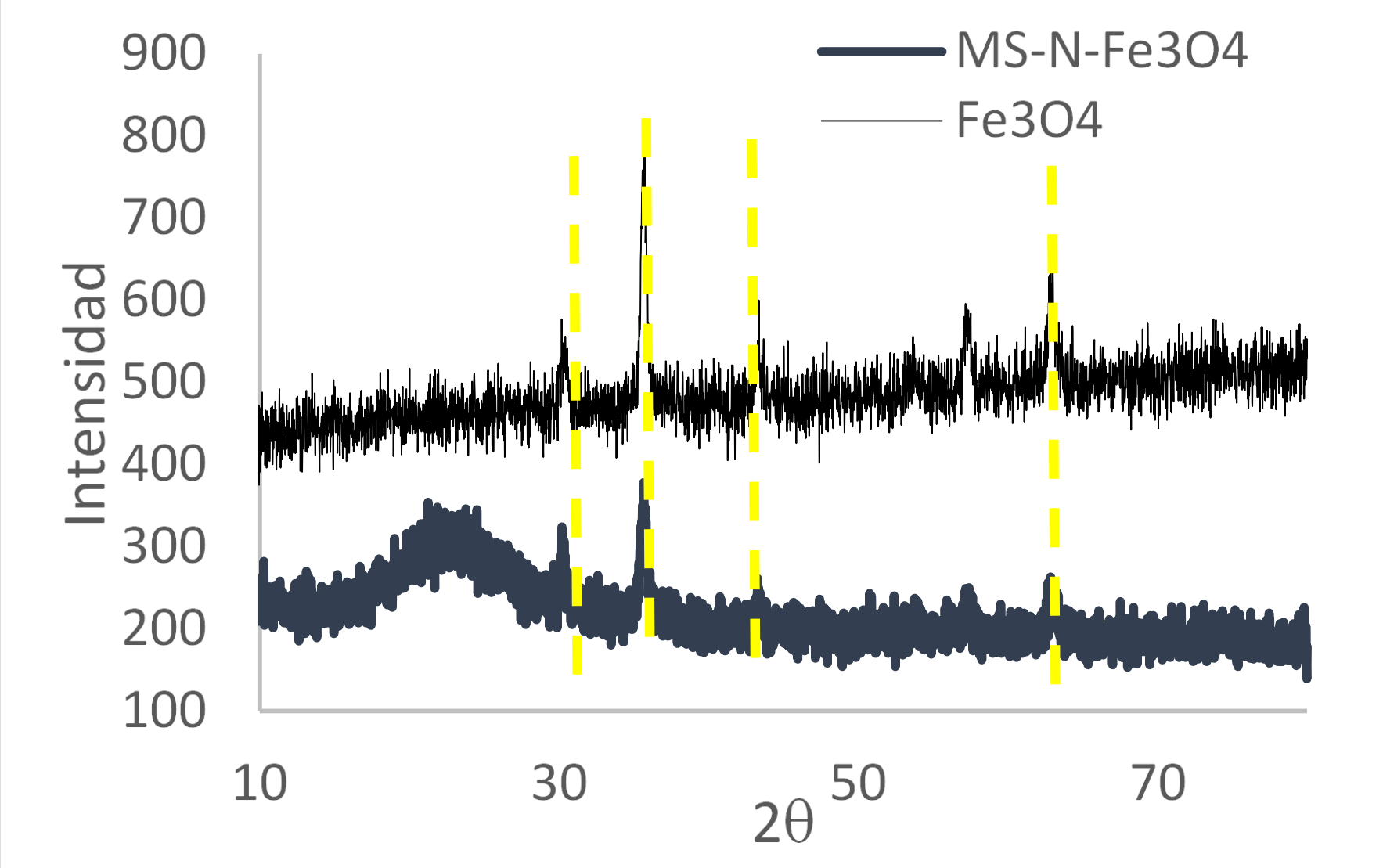
$MS\text{-}N_2\text{-}Fe_3O_4$

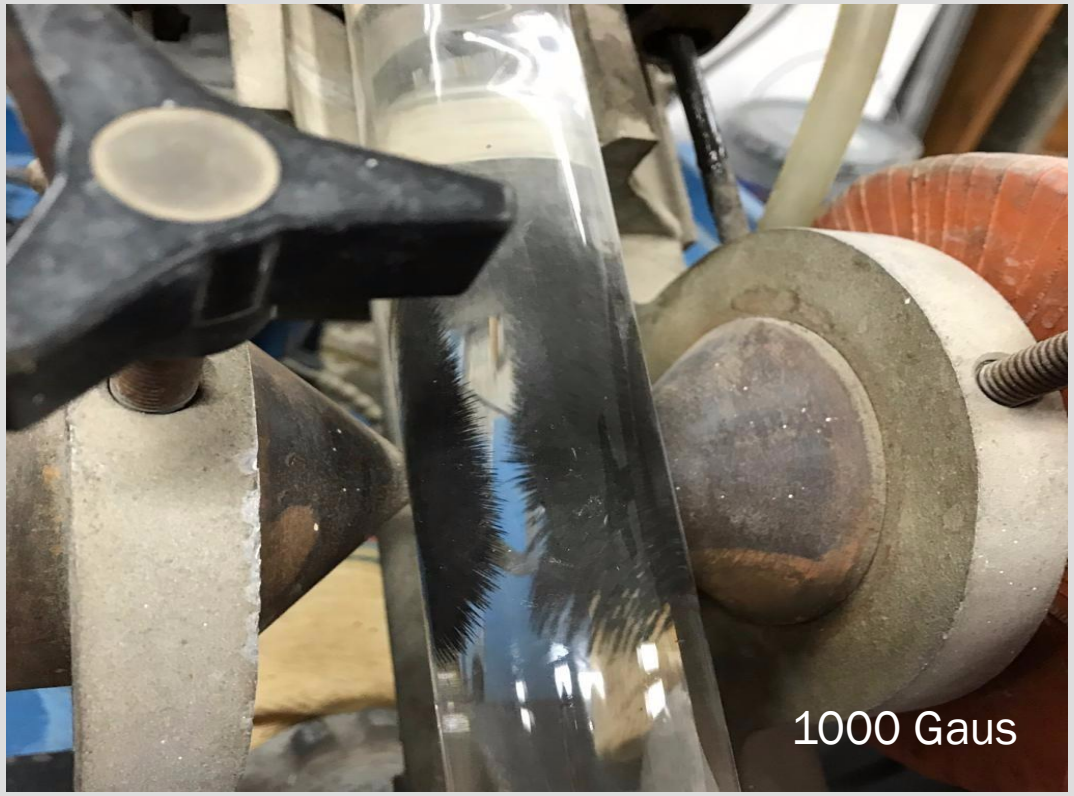


$MS\text{-}N_3\text{-}Fe_3O_4$



DRX

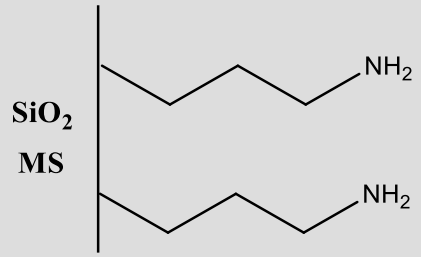

MS-N-Fe3O4
Fe3O4
Intensidad
900
800
700
600
500
400
300
200
100
10
30
50
70
2θ

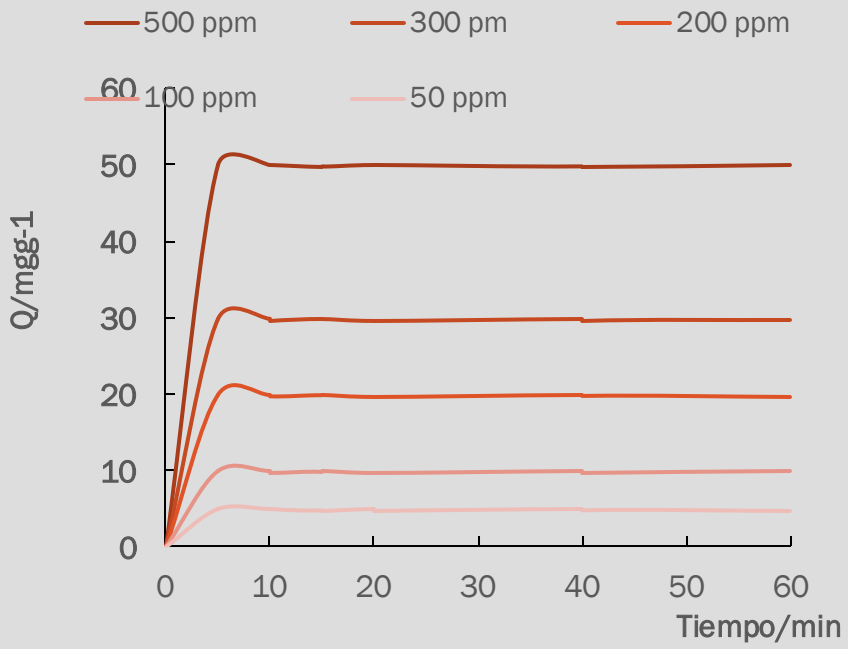


Intensidad Campo [Gauss]	Categoría/Mineral
500-5000	**Fuertemente Magnéticos** Magnetita, Franklinita, Leucita, Sílice, Pirrotita
5000-10000	**Moderadamente Magnéticos** Ilmenita, Biotita, Granate, Wolframita
10000-18000	**Débilmente Magnéticos** Hematita, Columbita, Limonita, Pirolusita, Rodocrosita
18000-23000	**Probremente Magnético** Rutilo, Rodanita, Dolomita, Zircon, Esfalerita, Cerusita, Monacita, Tantalita

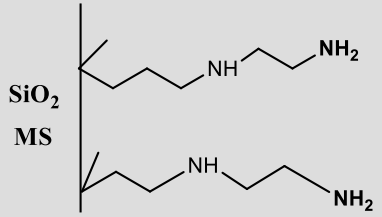
II. Estudios de Adsorción Au(III)

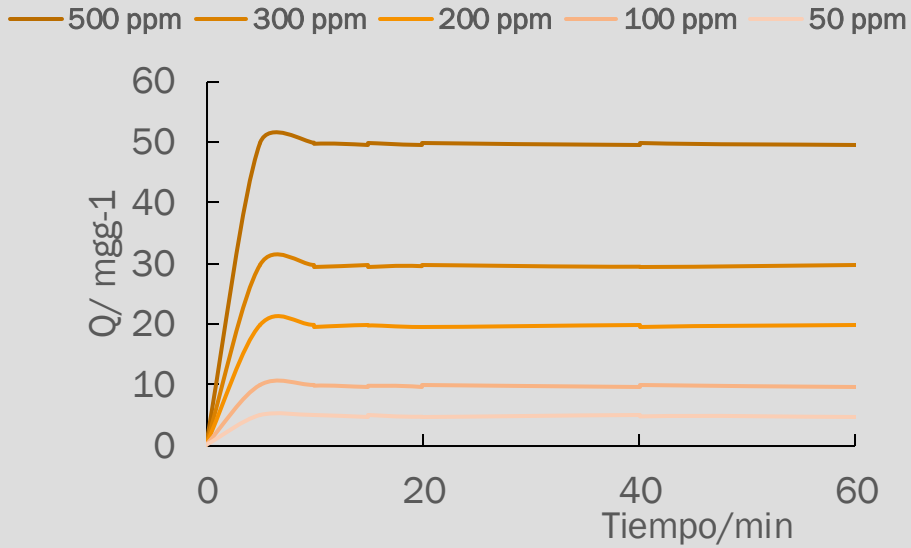
GMS-N-Fe



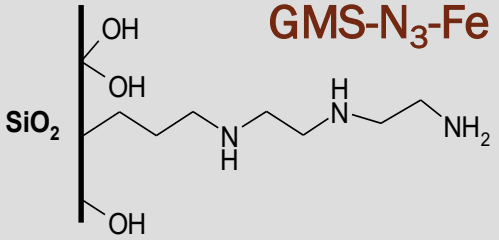


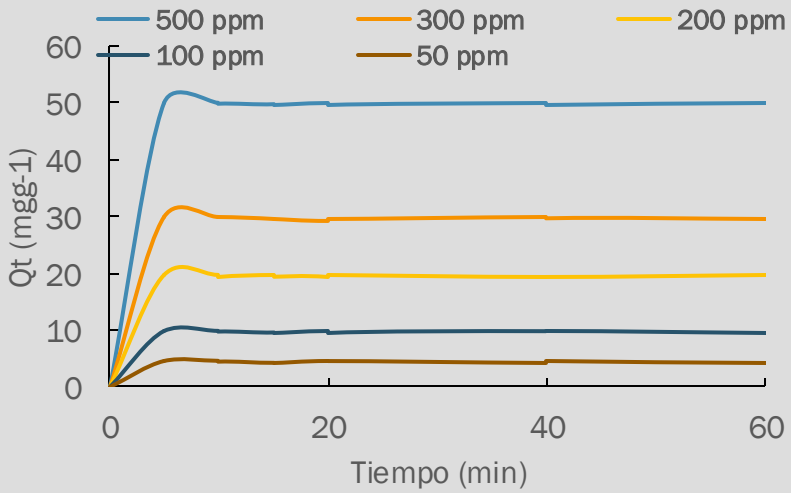
GMS-N_2-Fe

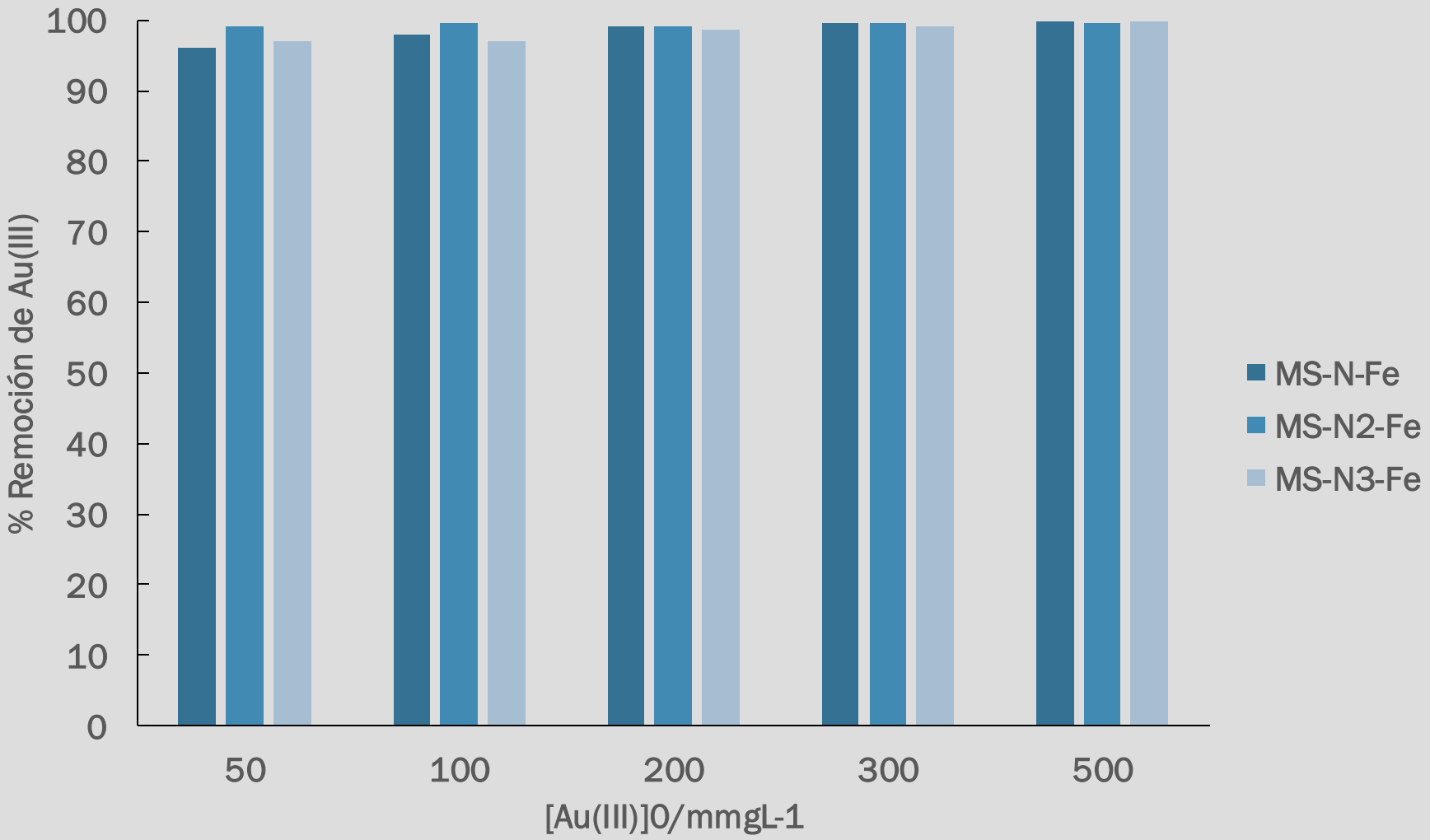




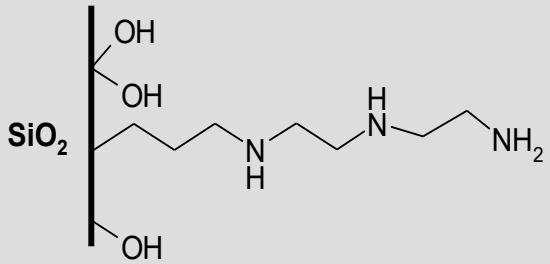
GMS-N_3-Fe





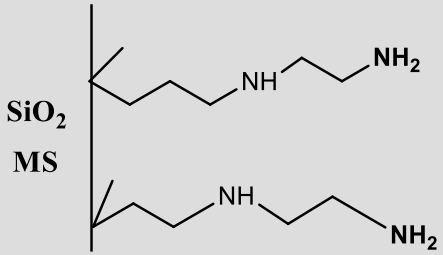

100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
% Remoción de Au(III)
50
100
200
300
500
[Au(III)]0/mmgL-1
MS-N-Fe
MS-N2-Fe
MS-N3-Fe

Análisis cinética de adsorción

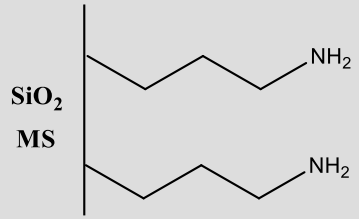


$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{K_2 Q_e^2} + \frac{1}{Q_e} t \qquad R_w = \frac{1}{1+Q_e K_2 t_{ref}}$$

$[Au(III)]_0$/ mgL^{-1}	50	100	200	300	500
Qe^{cal}/mgg^{-1}	4.47	9.71	19.61	29.67	50
Qe^{exp}/ mgg^{-1}	4.48	9.7	19.7	29.7	49.86
K_2/ $gmg^{-1}min^{-1}$	20.8134	6.631	8.67	5.678	2
Rw	0.0005	0.0008	0.0003	0.0003	0.0005
K_2Qe/ min^{-1}	93.125	64.375	170	168.5	100
System observation	Drastically close to equilibrium	Drastically close to equilibrium	Drastically close to equilibrium	Drastically close to equilibrium	Drastically close to equilibrium

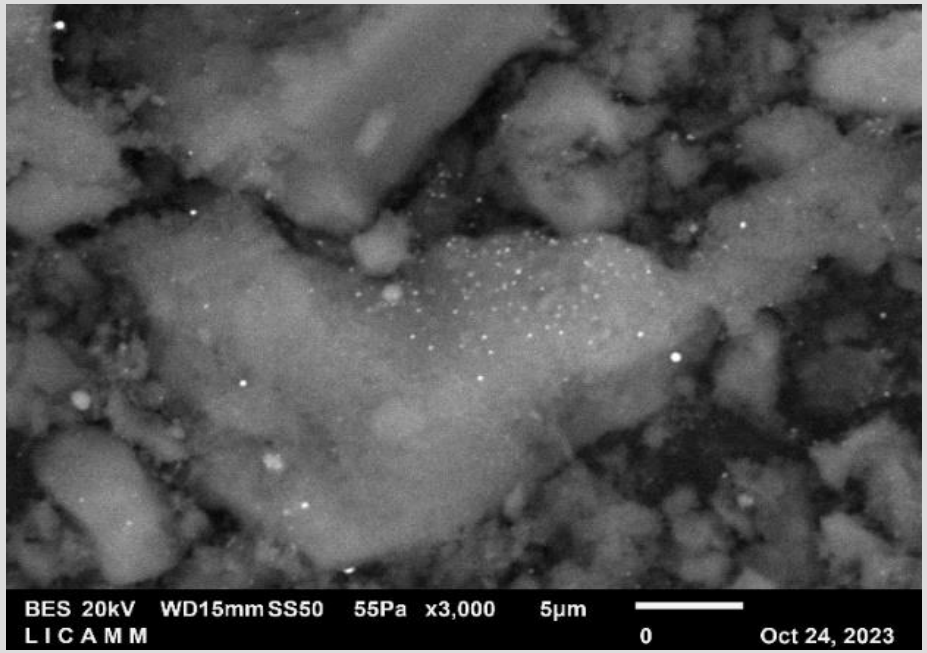


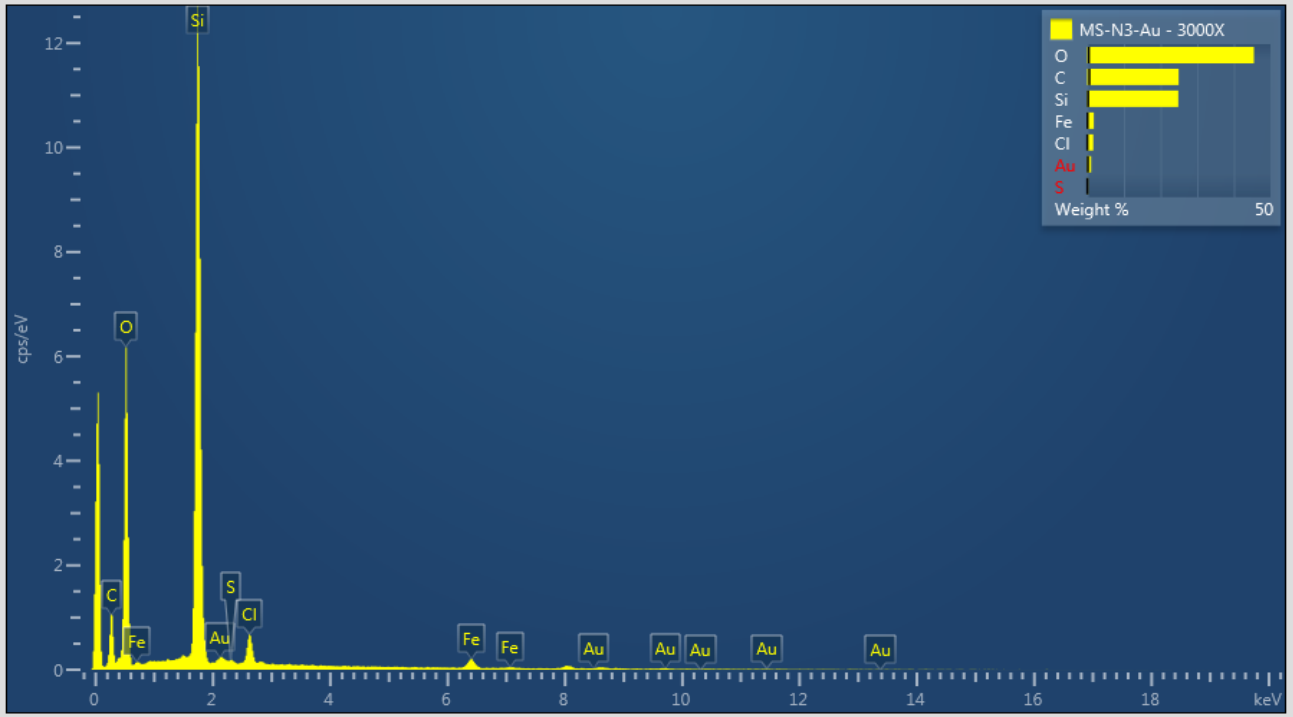
MS-N_2-Fe						
$[Au(III)]_0$/ mgL^{-1}	Qe^{cal}/mgg^{-1}	Qe^{exp}/ mgg^{-1}	K_2/ $gmg^{-1}min^{-1}$	Rw	K_2Qe/ min^{-1}	$t_{1/2}$/min
50	4.962	4.95	9.228	0.0011	45.795	0.0218
100	9.920	9.94	3.277	0.0015	32.516	0.0307
200	19.841	19.8	12.7008	0.00019	252	0.00396
300	29.850	29.8	1.8704	0.00089	55.833	0.0179
500	49.751	49.8	1.347	0.00074	67	0.01492



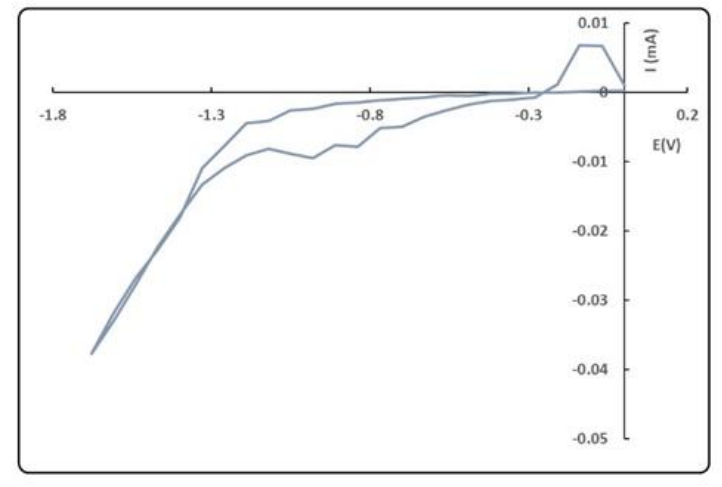
MS-N-Fe						
$[Au(III)]_0$/ mgL^{-1}	Qe^{cal}/mgg^{-1}	Qe^{exp}/ mgg^{-1}	K_2/ $gmg^{-1}min^{-1}$	Rw	K_2Qe/ min^{-1}	$t_{1/2}$/min
50	4.80	4.8	0.426	0.023	2.0471	0.488
100	9.83	9.8	1.045	0.005	10.272	0.0973
200	19.84	19.8	25.401	9.91E-05	504	0.00197
300	29.85	29.9	11.22	0.00015	335	0.00298
500	50	49.8	20	4.99E-05	1000	0.001

Caracterización del la MS-N_3-Fe-Au adsorbido

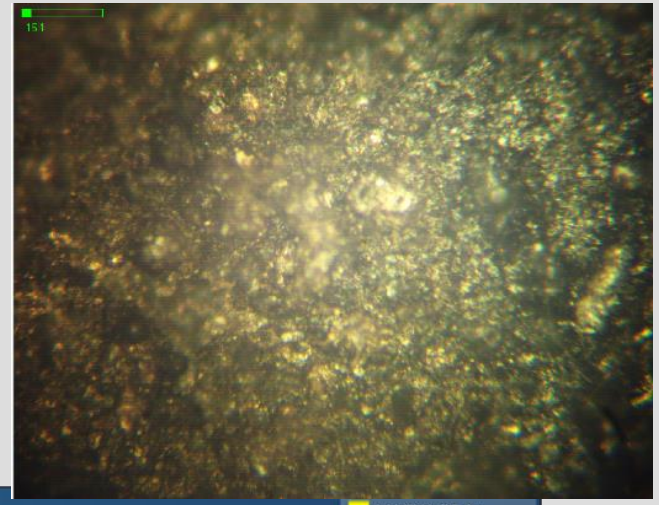


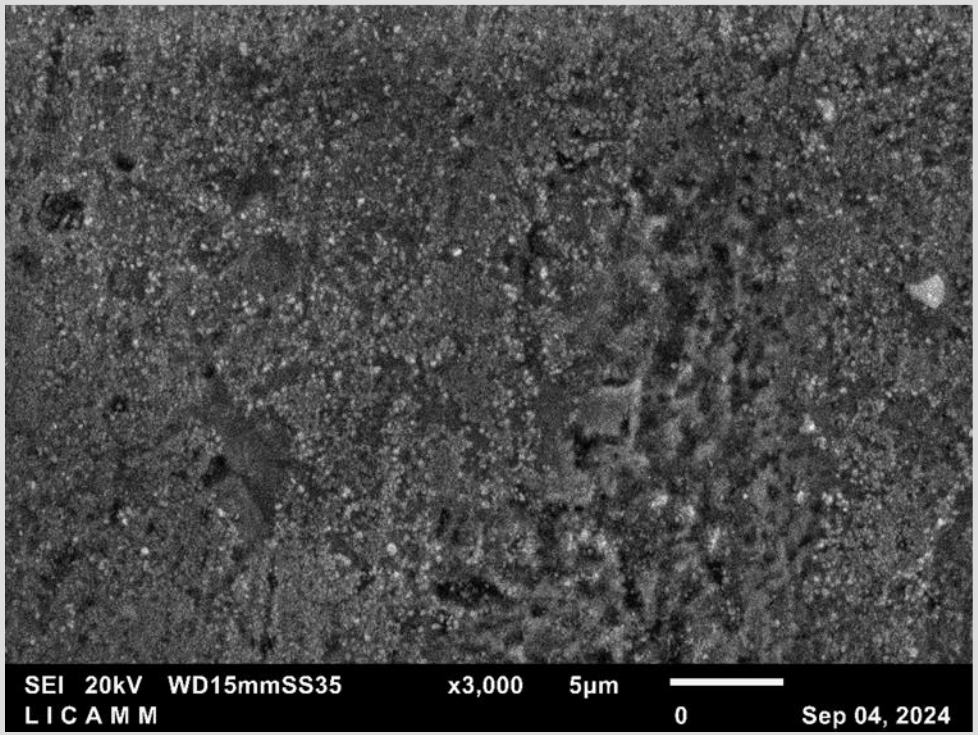


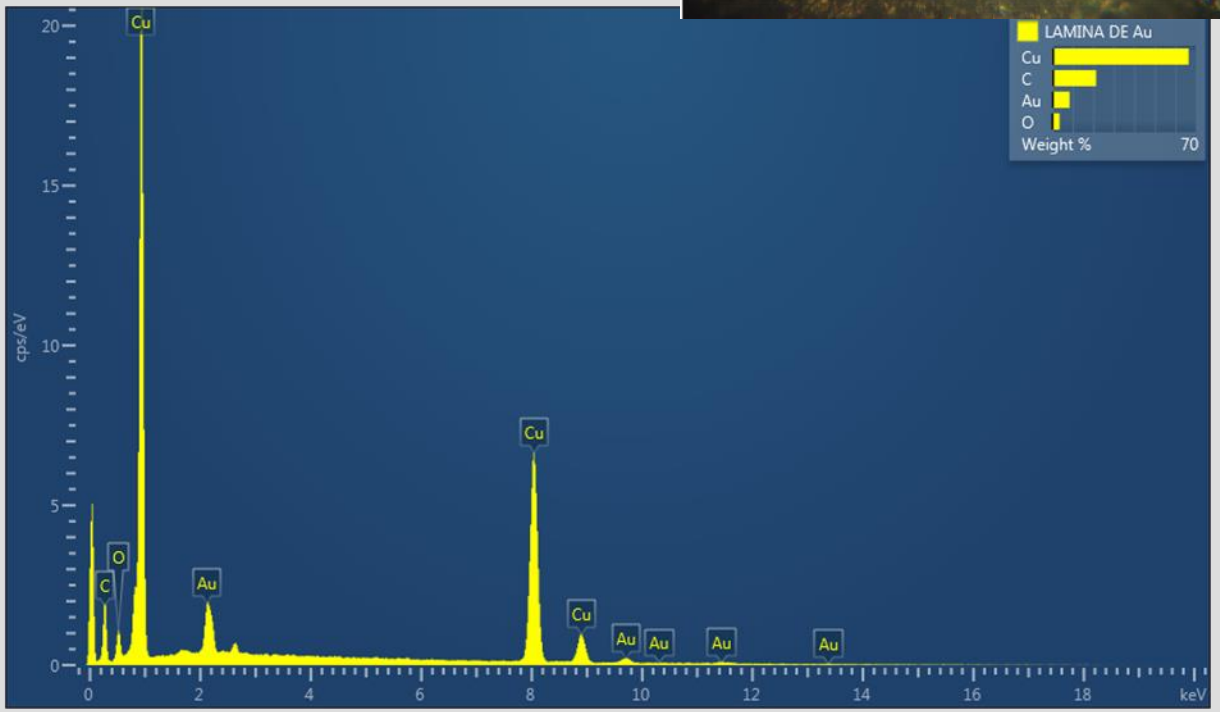
Caracterización del Au recuperado por electro-depósito



nano-esferas que van en tamaños de 147 a 294 nm, depositados sobre lamina de cobre







CONCLUSIONES

La caracterización por FTIR, RMN CPMAS de ^{13}C y ^{29}Si, garantizan la presencia del grupo trietilendiamino presente en la silice mesoporosa, mientras que la SEM-EDS muestra la presencia de la Fe_3O_4 en el material lo que lo potencializa a su uso en concentraciones magnéticas. La capacidad de remoción de Au(III) observada fue cuantitativa por encima del 90% en un rango de concentración de 50-500 mgL^{-1}, los datos experimentales se ajustaron al modelo cinético de seudo segundo orden (PSO), mostrando en todos los casos sistemas tendientes drásticamente al equilibrio, lo que muestra un proceso de adsorción favorable, el análisis de los parámetros cinéticos del sistema muestra una mayor rapidez en la adsorción de Au(III) con el aumento del número de grupos amino presentes en el material, lo que sugiere que los grupos amino son sitios activos para el proceso de adsorción.

GRACIAS POR SU ATENCIÓN

AGRADECEMOS EL SOPORTE FINANCIERO
DE LA UG y A LA SIP-IPN A TRAVES DE LOS PROYECTOS:
CIIC 268/2024 y SIP 2024/420 y 2024/2847.