



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN METALURGIA Y
MATERIALES

TESIS

**MECANISMO DE BIOSORCIÓN DE ORO Y PLATINO EN
SOLUCIONES ACUOSAS MEDIANTE BIOMASA MUERTA DE
*ASPERGILLUS NIGER***

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORA EN CIENCIAS EN METALURGIA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES

Presenta:

M.C.I.A Gabriela Elizabeth Tapia Quiroz

Director de Tesis:

Dr. Ramiro Escudero García

Co-director:

Dr. Raúl Cortés Martínez

Morelia, Mich. Marzo 2025

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer muy especialmente el apoyo brindado para la realización de esta investigación a mi asesor:

Dr. Ramiro Escudero García

Por la guía y apoyo brindados, por la aportación de sus conocimientos, por su dedicación como asesor y sobre todo, por la confianza que deposito en mí, motivándome día con día a seguir adelante siendo un ejemplo a seguir como investigador.

A mi coasesor:

Dr. Raúl Cortés Martínez

Por las sugerencias constructivas, por el apoyo, comprensión y paciencia brindados, gracias.

Los miembros del jurado, por las sugerencias constructivas que permitieron mejorar y complementar esta investigación.

Al Dr. Víctor López, por su empatía y apoyo brindados.

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por el apoyo económico otorgado para la realización de mis estudios de doctorado.

Al Laboratorio de Análisis químico a cargo de la Maestra M. Remedios Cisneros por permitir realizar parte del trabajo experimental y ser partícipe de mi formación profesional.

Selene Anaid Valencia Leal, por el apoyo brindado.

A mi mejor amiga, Iris Andrea Coria Zamudio agradezco de una manera especial por su apoyo brindado en todos los aspectos, por su compañía y empatía en los buenos y malos momentos, por siempre estar para mí, gracias.

Agradezco muy especialmente a mi madre **Teresa Quiroz Cortés** por su apoyo incondicional, por su paciencia y su cariño y a su esposo Francisco Dueñes por su apoyo y empatía

.



DEDICATORIAS

A DIOS OMNIPOTENTE Y ETERNO

A MI MADRE, CON TODO MI AMOR Y GRATITUD

A MI PADRE †: **“SIGUE ADELANTE COMO SI YO ESTUVIERA CONTIGO”**

CUYAS PALABRAS RESUENAN EN MI MENTE DÍA A DÍA Y SU RECUERDO SIEMPRE PRESENTE EN MI CORAZON.

A MI HIJA, ADRIANA ELIZABETH, EL MÁS HERMOSO REGALO QUE DIOS ME MANDO, EL MOTOR DE MI VIDA, MI RAZON DE SER.

A FRANK CON CARÍÑO Y GRATITUD.



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURA.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos:.....	2
1.1.1. Objetivo general.....	2
1.1.2. Objetivos particulares	2
1.2. Justificación	2
1.3. Hipótesis	3
1.4. Metas científicas	3
1.5. Metas Tecnológicas	3
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Metales del grupo del platino (MGP)	4
2.2 Procesos clásicos para la recuperación de MGP.....	4
2.3. Adsorción de metales preciosos y platinoides	6
2.3.1 Mecanismo general de adsorción.....	6
2.3.2. Mecanismos generales de biosorción mediante microorganismos.	6
2.3.3 Mecanismos de biosorción con biomazas fúngicas	11
2.3.4 Equilibrio de biosorción.....	12
2.3.5 Modelado cinético.....	13
2.3.6. Isotermas de adsorción.....	13
2.3.7 Aspectos termodinámicos	14
2.3.8 Biosorbentes.....	15
2.4 <i>Aspergillus niger</i>	18
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	23
3.1 ETAPA I. Caracterización del Mineral y de la Biomasa.	23
3.1.1. Caracterización del Mineral.....	23
3.1.2. Biomasa.....	25
3.2 Etapa II. Generación de biomasa muerta.	26
3.2.1 Obtención de biomasa.....	27

3.2.2	Purificación de la cepa.....	27
3.2.3	Monitoreo morfológico.....	27
3.2.4	Producción de biomasa fúngica.....	28
3.3	Etapa III. Experimentos con soluciones sintéticas.....	29
3.3.1	Efecto de pH sobre la precipitación de oro y platino.....	29
3.3.2	Experimentos de biosorción.....	30
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		32
4.1.	Caracterización del mineral.....	32
4.1.1.	Distribución de tamaño de partícula y D80.....	32
4.2.	Caracterización de la biomasa antes del contacto.....	39
4.2.1.	caracterización por microscopía óptica (MO).....	39
4.3.	Efecto del pH en la precipitación de metales con soluciones sintéticas unitarias	41
4.4.	Biosorción de iones metálicos por el contacto biomasa muerta-solución sintética ..	42
4.4.1.	Soluciones sintéticas unitarias.....	42
4.4.1.1.	Sistema biomasa - oro.....	43
4.4.1.2.	Sistema biomasa - platino.....	44
4.4.2.	Soluciones sintéticas binarias	47
4.4.2.1.	Sistema biomasa oro - platino.....	47
4.4.2.2.	Monitoreo de pH, Conductividad eléctrica y ORP en el proceso de biosorción del sistema Pt-Au	48
4.4.2.3.	Sistemas biomasa platino- resto de los metales.....	49
4.4.2.4.	Sistema biomasa oro- resto de los metales	51
4.5.	Resultados de FT-IR de la biomasa muerta, antes y después del contacto. Solución con platino Biosorción de iones metálicos por el contacto biomasa muerta-solución sintética	53
4.6.	Resultados de FT-IR de la biomasa muerta, antes y después del contacto. Solución con oro	55
4.7.	Resultados por MEB de la biomasa muerta después del contacto. Solución con oro ..	57
4.8.	Resultados por MEB de la biomasa muerta después del contacto. Solución con platino. .	59
4.9.	Caracterización de las soluciones sintéticas antes del contacto mediante espectroscopía UV-Vis. Caso platino y caso oro.....	60
4.10.	Modelos que describen la cinética de biosorción	62

4.10.1. Sistema unitario biomasa-platino y biomasa-oro	62
4.10.2. Sistema binario biomasa-platino-oro	63
4.11. Efecto de la relación biomasa-metal en la selectividad y extensión de la adsorción	65
4.11.1. Cantidad de biomasa óptima.....	65
4.11.2. Variaciones del pH, Conductividad eléctrica y ORP	69
CONCLUSIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	73
ANEXO A.....	77
ANEXO B.....	80
ANEXO C.....	83

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 2.1. Mecanismos de interacción entre metales pesados y microorganismos.....	7
Figura 2.2. Mecanismos de biosorción. a) Clasificados según la dependencia del metabolismo de las células. (b) Clasificados según el lugar donde se encuentre el metal removido.	9
Figura 2.3. A Cultivo de <i>Aspergillus niger</i> . B <i>Aspergillus niger</i> . Izquierda (10X).	19
Figura 2.4. <i>Aspergillus niger</i> . A microconidios; B fiálides; C vesícula; D conidióforo (azul de algodón, 40X) [36].....	19
Figura 2.5. Estructura y composición de la pared celular de un hongo. Modificado de Beauvais y col., por Yamily Burgos.	21
Figura 3.1. Diagrama de bloques de la Etapa 1. Caracterización del mineral y de la biomasa. .	23
Figura 3.2. Diagrama de bloques de la fase experimental, etapa 2, obtención de biomasa.	26
Figura 3.3. Técnica del celo. Observación microscópica del micelio aéreo [45].	28
Figura 3.4. Diagrama de bloques de la fase experimental, Etapa 3, experimentos con soluciones sintéticas.....	29
Figura 4.1. Distribución del tamaño de partícula del mineral.	32
Figura 4.2. Determinación gráfica del D_{80} del mineral de cabeza.	33
Figura 4.3. Difractograma con las especies minerales correspondientes al mineral de cabeza..	34
Figura 4.4. Determinación del Pt por absorción atómica a través de digestión con agua regia y digestión con AR + HF + H_3BO_4	36
Figura 4.5. Determinación del Au por absorción atómica a través de digestión con agua regia y digestión con AR + HF + H_3BO_4	36
Figura 4.6. Micrografía de las partículas de <i>Aspergillus niger</i> a 1000X.	38
Figura 4.7. Microanálisis elemental del campo observado en la micrografía.	38
Figura 4.8. a) Cultivo de <i>Aspergillus niger</i> ; b) <i>Aspergillus niger</i> (Azul de lactofenol, 40X). 39	
Figura 4.9. Espectro FT-IR de la biomasa muerta de <i>Aspergillus niger</i>	40
Figura 4.10. Diagramas de especiación de los sistemas Au- H_2O -Cl y Pt- H_2O -Cl a 25°C.	42
Figura 4.11. Comportamiento de la cinética de biosorción a pH 2 de los elementos Au, Pt, Fe Al, Ti, Cu y Ca.	43
Figura 4.12. Comportamiento de la cinética de biosorción de oro a pH 2, 4 y 6.	44
Figura 4.13. Comportamiento de la cinética de biosorción de platino a pH 2, 4 y 6.....	45
Figura 4.14. Porcentaje de remoción del sistema binario Pt- Au.....	47
Figura 4.15. Representación gráfica de la variación del pH 4 y la conductividad eléctrica en el sistema Pt-Au.	48
Figura 4.16. Representación gráfica de la cinética para el monitoreo del Potencial de óxido-reducción (ORP) a pH 4 para el sistema binario Pt-Au y diagrama de Pourbaix de los sistemas Au- H_2O -Cl y Pt- H_2O -Cl.	49
Figura 4.17. Porcentaje de biosorción de los sistemas binarios de platino: Pt- Fe, Pt-Ca, y Pt-Cu.	50
Figura 4.18. Porcentaje de remoción de los sistemas binarios de platino: Pt-Al y Pt- Ti.....	50
Figura 4.19. Porcentaje de remoción de los sistemas binarios de oro: Au- Fe, Au-Ca, y Au-Cu. 52	
Figura 4.20. Porcentaje de biosorción de los sistemas binarios de oro: Au- Ti y Au-Al.	52
Figura 4.21. Espectro FT-IR de la biomasa y de la biomasa + Pt en un rango de pH de 2-6, antes y después del contacto entre biomasa y la solución sintética.	54

Figura 4.22. Espectro FT-IR de la biomasa y de la biomasa + Au en un rango de pH de 2-6. Antes y después del contacto biomasa-solución sintética.....	56
Figura 4.23. Micrografías de A) Biomasa fúngica de <i>Aspergillus niger</i> a 5000x; B), C) y D) Biomasa después de la biosorción de oro a 5000x, Biomasa + Au a 10000x y Biomasa + Au a 5000x, respectivamente con partículas de oro en un sistema de una concentración a 20 ppm. ...	58
Figura 4.24. Análisis elemental por MEB, correspondiente a la micrografía C) de la Figura 4.25	59
Figura 4.25. Micrografías de A) Biomasa fúngica de <i>Aspergillus niger</i> antes del contacto y B), C) y D) Biomasa después del contacto con la solución de platino.	60
Figura 4.26. Espectro UV-Vis de la solución de platino con un pico a 260 nm correspondiente al compuesto PtCl_6^-	61
Figura 4.27. Espectro por UV-Vis de la solución de oro que muestra un pico a 310 nm correspondiente al compuesto AuCl_4^-	62
Figura 4.28. Modelos cinéticos para la biosorción de oro y platino en sistemas unitarios.....	63
Figura 4.29. Modelos cinéticos para la biosorción del sistema binario platino-oro (a y b, respectivamente).	64
Figura 4.30. Cantidad óptima de biomasa muerta (g) de <i>Aspergillus niger</i> para oro y platino. ..	66
Figura 4.31. Concentración óptima de biomasa muerta de <i>Aspergillus niger</i> para recuperaciones máximas de metales en los sistemas Au-Fe, Au-Ca, Au-Cu y Au-Al.	67
Figura 4.32. Concentración óptima de biomasa muerta de <i>Aspergillus niger</i> para los sistemas Pt-Fe, Pt-Ca, Pt-Cu y Pt- Al.....	69
Figura 4.33. Localización de las especies acuosas formadas durante la experimentación, de acuerdo a los diagramas de Pourbaix para los sistemas Pt-H ₂ O-HCl y Au-H ₂ O-HCl [58].	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Ejemplos de microorganismos como biosorbentes de metales preciosos.	17
Tabla 3.1. Morfología macroscópica descriptiva de un hongo filamentoso.	27
Tabla 4.1. Análisis químico por FRX del mineral de platino, expresado en porcentaje elemental.	34
Tabla 4.2. Análisis químico cuantitativo realizado al mineral de cabeza por EAA.	35
Tabla 4.3. Estimación de la densidad del mineral de cabeza.	37
Tabla 4.4. Grupos funcionales y número de onda identificados por FTIR la biomasa.	41
Tabla 4.5. Resultados del análisis cuantitativo de Au y Pt en las soluciones residuales, a diferentes valores de pH.	41
Tabla 4.6. Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP), en las soluciones unitarias durante los experimentos de bioadsorción. Sistemas unitarios Pt y Au..	46
Tabla 4.7. Capacidad de retención al equilibrio (q_e), constante de velocidad de adsorción (k) y coeficiente de correlación (R^2) de los sistemas unitarios Au y Pt.	63
Tabla 4.8. Capacidad de retención al equilibrio (q_e), constante de velocidad de adsorción (k) y coeficiente de correlación (R^2) del sistema Pt-Au.	64
Tabla 4.9. Porcentaje de recuperación en función de la concentración de biomasa muerta <i>Aspergillus niger</i>	66
Tabla 4.10. Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP), en las soluciones binarias durante los experimentos de bioadsorción. Sistema binario Pt-Au.	70

RESUMEN

La lixiviación de minerales y recuperación de metales preciosos con microorganismos es una técnica basada en el uso de bacterias, levaduras y hongos no patógenos. La capacidad de algunas biomásas para recuperar metales de soluciones es la base para la innovación en tecnologías de recuperación; por ejemplo, para adsorber metales preciosos disueltos en un medio líquido.

En esta investigación, se estudió la biosorción de oro y platino de un medio líquido utilizando biomasa muerta del hongo *Aspergillus niger*. Se llevaron a cabo experimentos tipo lote con soluciones sintéticas unitarias y binarias en el sistema biomasa-metales, con concentraciones conocidas de oro o platino (20 ppm) y alguno de los metales cobre, calcio, titanio o aluminio (50 ppm); fueron puestas en contacto con el hongo durante 120 minutos a pH 4, para establecer la capacidad de biosorción de *Aspergillus niger* sobre los metales, así como la selectividad de bioadsorción de platino y oro en presencia de los metales cobre, calcio, titanio, aluminio, y hierro. Los metales incluidos en la experimentación con soluciones sintéticas son los que contiene el mineral aurífero motivo de este estudio.

Durante el trabajo experimental fueron monitoreadas las variables pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP). Al finalizar el contacto se recolectaron alícuotas del medio acuoso residual para analizarlas mediante las técnicas de espectroscopía de absorción atómica y de UV-Vis; la biomasa fue analizada por FT-IR y MEB antes y después del contacto con la solución preñada con metales.

Para la bioadsorción de los metales Au y Pt (por separado), se recuperaron el 98 y 100 % respectivamente, después de 120 minutos de contacto solución-biomasa a pH 4, estableciendo que la recuperación depende en gran medida de los sitios activos (funcionales) en la superficie de la biomasa. De los resultados de la cinética de biosorción se establece que el mecanismo que rige el proceso es fisisorción.

Los espectros de infrarrojo indican que los grupos funcionales de carga positiva o neutra (N-H, C-H y C-H₂) en la superficie de la biomasa son los responsables de atrapar los compuestos iónicos en forma de cloruros (PtCl₆²⁻, AuCl₄⁻), identificados por la técnica de UV-Vis y en acorde con los respectivos diagramas de Pourbaix. El análisis elemental por MEB del hongo después del contacto

con la solución preñada confirma la presencia de oro y platino en la estructura morfológica del hongo.

Palabras clave: Biomasa, solución binaria, biosorción, oro, platino, *Aspergillus niger*.



ABSTRACT

Mineral leaching and precious metal recovery with microorganisms are techniques based on the use of non-pathogenic bacteria, yeasts, and fungi. The ability of some biomasses to recover metals from solutions is the basis for innovation in recovery technologies, such as adsorbing precious metals dissolved in a liquid medium.

In this investigation, the biosorption of gold and platinum from a liquid medium was studied using dead biomass of the fungus *Aspergillus niger*. Batch experiments were carried out with synthetic unitary and binary solutions in the biomass-metals system, with known concentrations of gold or platinum (20 ppm), and one of the metals copper, calcium, titanium, or aluminum (50 ppm); they were put in contact with the fungus for 120 minutes at pH 4, to establish the biosorption capacity of *Aspergillus niger* on the metals, as well as the adsorption selectivity of platinum and gold in the presence of the metals copper, calcium, titanium, aluminum, and iron. The metals included in the experimentation with synthetic solutions are those contained in the gold-bearing mineral subject of this study.

During the experimental work, the variables: pH, electrical conductivity, and redox potential (ORP) were monitored. At the end of the contact, aliquots of the residual aqueous medium were collected to be analyzed by atomic absorption techniques and UV-Vis spectroscopy; the biomass was analyzed by FT-IR, and SEM before and after contact with the pregnant solution.

For the biosorption of Au and Pt (separately), 98 and 100 % were recovered, respectively, after 120 minutes of solution-biomass contact at pH 4. This establishes that the recovery depends largely on the active (functional) sites on the biomass surface. From the results of the biosorption kinetics, it is established that the mechanism governing the process is physisorption.

Infrared spectra indicate that positively or neutrally charged functional groups (N-H, C-H, and C-H₂) on the biomass surface are responsible for trapping ionic compounds in the form of chlorides (PtCl₆²⁻, AuCl₄⁻), identified by UV-Vis technique and by the respective Pourbaix diagrams. Elemental analysis by SEM of the fungus after contact with the pregnant solution confirms the presence of gold and platinum in the morphological structure of the fungus.

Keywords: Biomass, binary solution, biosorption, gold, platinum, *Aspergillus niger*.



CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En virtud de sus propiedades físicas y químicas los metales preciosos o nobles son altamente estables y son extensamente utilizados en distintas áreas, como catalizadores, en la producción de componentes eléctricos y electrónicos, aplicaciones médicas y joyería, entre otros [1]. Dentro de los metales preciosos o nobles también se consideran a los metales del grupo del platino (MGP), que comprenden platino, paladio, rodio, iridio, rutenio y osmio. El platino es el metal traza más costoso correspondiente a los MGP; tiene diversas aplicaciones industriales, siendo las más importantes la industria automotriz (producción de catalizadores), petroquímica y petrolera [2], también se ha implementado como tratamiento contra el cáncer en el área médica [3].

Tradicionalmente los metales son recuperados a partir de minerales que los contienen o bien de soluciones acuosas y residuales así como de materiales de desecho o jales [2]. Se han recuperado, a partir de minerales por procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos, por lixiviación ácida, a partir de sus propiedades químicas, como la variación en sus estados de oxidación y la coordinación de sus complejos en medio cloruro [4]. Existen varias técnicas disponibles que permiten su separación como el intercambio iónico, la extracción líquido-líquido, filtración por membranas y la adsorción. Dichas técnicas se han aplicado para la recuperación de metales preciosos a partir de aguas de desecho industrial provenientes de procesos metalúrgicos, pero resultan ser procedimientos costosos, requieren mucho trabajo y tiempo, además de ser complicados [1]. Una tecnología prometedora y rentable para la recuperación de metales preciosos es la biosorción. En virtud de que la biomasa inactiva o muerta concentra y une a los iones metálicos presentes en soluciones acuosas y aguas residuales. Estos tipos de biomasas están disponibles en grandes cantidades y son de bajo costo [5]. Este proceso tiene lugar en la pared celular y es independiente del metabolismo [6], además que difiere el mecanismo de biosorción dependiendo del tipo de biomasa tratada [7].

Otra ventaja de la biosorción es que puede utilizarse in situ y, es posible que no requiera ninguna operación de proceso industrial y por consiguiente, se pueda integrar con una variedad de sistemas resultando ser más ecológica [8]; además, emplea una amplia variedad de microorganismos, que incluye bacterias, hongos, algas y levaduras para la recuperación de iones metálicos [7]. Algunos investigadores han reportado la recuperación de metales preciosos a partir de biomasa, por

ejemplo, Darnalt y colaboradores realizaron estudios de biosorción en donde el alga *Chlorella vulgaris* capturaba más del 90% de oro en solución aunque esta estuviera muy diluida [9,10].

Se han realizado estudios dirigidos a la biosorción para la recuperación de platino, sin embargo, van dedicados a biomasa derivada de plantas y organismos marinos, la información con microorganismos (algunas cepas de bacterias, algas y hongos) es escasa. Por lo cual en este proyecto se empleará como biomasa una cepa fúngica *Aspergillus niger* para la recuperación de platino de un medio acuoso. Esta cepa no es patógena y de fácil reproducción. La anterior información permite establecer los objetivos de este trabajo de investigación.

1.1. Objetivos:

1.1.1. Objetivo general

Recuperar de una solución preñada polimetálica, el platino y oro, por biosorción selectiva, aplicando la biomasa muerta de *Aspergillus niger*.

1.1.2. Objetivos particulares

- Conocimiento físico y químico el mineral de cabeza motivo del estudio.
- Obtener biomasa de *Aspergillus niger* para su posterior aplicación en los experimentos de biosorción.
- Verificar el rango de pH de precipitación de los metales contenidos en el mineral.
- Determinar la capacidad de biosorción de *Aspergillus niger* sobre los metales de interés y los principales elementos mayoritarios en soluciones sintéticas unitarias.
- Determinar la selectividad del hongo *Aspergillus niger* en la biosorción de los metales de interés y los principales elementos mayoritarios en soluciones binarias.
- Establecer el efecto de la cantidad de biomasa en la selectividad y extensión de la bioadsorción.

1.2. Justificación

Los platinoideos y el oro tienen una gran variedad de aplicaciones industriales y tecnológicas debido a sus propiedades físicas y químicas que les confieren una alta estabilidad química y por su elevado costo como piezas de joyería u ornamentales. Sin embargo, su concentración en los minerales es

baja y aunada a la complejidad de las asociaciones minerales, es importante investigar y proponer técnicas alternativas que sean capaces de reemplazar a los métodos convencionales.

Un método biológico rentable para la recuperación de iones metálicos es la biosorción, a partir de una variedad de biosorbentes, que pueden ser microorganismos, desechos industriales y agrícolas, así como derivados de tejidos animales y vegetales. Hay pocos estudios de biosorción principalmente de platinoides dirigidos a microorganismos, la mayoría emplean biomasa de organismos marinos y plantas.

Por lo anterior, este proyecto de investigación propone la biosorción principalmente de platinoides y oro, con el hongo filamentoso ambiental *Aspergillus niger*, el cual puede competir contra métodos convencionales en la recuperación de iones metálicos y se ha probado su capacidad de remoción de metales en solución, según lo reportado en la literatura después de lixiviar con agua regia el mineral de platino.

1.3. Hipótesis

Aspergillus niger, es un hongo filamentoso que en su pared celular contiene grupos funcionales aniónicos; estas terminaciones funcionales atraerán y atraparán los iones de los platinoides y oro contenidos en una solución acuosa.

1.4. Metas científicas

Recuperar al menos el 70% de los iones de los iones metálicos de interés de la solución acuosa.

1.5. Metas Tecnológicas

- Diseñar un proceso de recuperación de los platinoides y oro por la ruta lixiviación-biosorción.
- Disminuir la contaminación por el uso excesivo de reactivos en la obtención de los metales.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Metales del grupo del platino (MGP)

Los metales del grupo del platino son platino, paladio, rodio, iridio, rutenio y osmio; están considerados dentro de los metales más escasos, por lo general se hallan juntos en la naturaleza; y junto con el oro y la plata son conocidos como metales preciosos o nobles. El 90% de los metales del grupo del platino corresponde a platino y paladio. Un 0.01% ppm representa al platino en la corteza terrestre aproximadamente. Se encuentra en aleaciones como platino-iridio y paladio-platino en su forma nativa, mientras que su forma química en la que se encuentra es $PtAs_2$, $(PtPd)S$, $(PtPd)NiS$.

Algunas propiedades de los MGP son resistividad química, estabilidad a altas temperaturas, propiedades eléctricas estables, capacidad de aleación y propiedades catalíticas únicas, entre otras. Debido a sus propiedades químicas se han recuperado, por la formación de clorocomplejos de platino ($PtCl_4^{2-}$, $PtCl_6^{2-}$), paladio ($PdCl_4^{2-}$, $PdCl_6^{2-}$) y rodio ($RhCl_6^{3-}$) y por la variación que presentan en sus estados de oxidación [11].

Se utilizan en una gran variedad de aplicaciones tales como el chapado de metales y en dispositivos y sensores electrónicos en las industrias químicas; se utilizan también como catalizadores o electrodos en pilas de combustible o para fabricar nanomateriales de almacenamiento de hidrógeno, principalmente el platino y paladio [12].

Los MGP son utilizados en diversas reacciones orgánicas, como la hidrogenación, oxidación, isomerización, ciclación, formación de enlaces carbono-carbono, debido a sus excelentes propiedades catalíticas. El elemento de los MGP que más aplicaciones tiene en reacciones orgánicas es el rutenio, seguido por el rodio y paladio, continuando con platino, luego iridio y finalizando con osmio [11].

2.2 Procesos clásicos para la recuperación de MGP

Hoy en día, existen varias técnicas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas para la recuperación de metales preciosos, sin embargo, presentan ciertas desventajas como un alto costo, alto consumo de energía y contaminación de agua [13].



Éstos procesos se han dirigido, principalmente a la recuperación del platino y paladio [1]. Primeramente, se lleva a cabo la lixiviación con agua regia para llevar a cabo la disolución de platino, paladio y oro. Primeramente, se recupera el oro a partir de una precipitación con un agente reductor, puesto que, de los tres, es el más noble termodinámicamente y posteriormente, con cloruro amónico se precipita el platino como complejo de hexacloroplatinato de amonio y mediante una reducción con ácido fórmico y calcinación, se obtiene el metal puro. Sin embargo, se requiere de varias operaciones de redisolución y reprecipitación para lograr el grado de pureza comercializable [11]. En la siguiente etapa, en seguida de la eliminación del platino, se recupera el paladio. Primeramente, se eliminan los metales base, agregando amoniaco hasta un pH aproximado de 8, en seguida, se logra un pH de 1 acidificando con ácido clorhídrico, logrando un precipitado de cloruro de paladio (II). Se agrega amoniaco lentamente, ya que alcanza una temperatura de 60-80°C debido a que la reacción que se lleva a cabo es exotérmica. A partir de una reducción y/o calcinación se recupera el paladio de la sal, sin embargo, se necesitan varias operaciones para alcanzar el grado de pureza necesario, mismo caso que para el platino [11].

A partir del residuo de la lixiviación con agua regia del material de partida se realiza la recuperación de los metales del grupo del platino secundarios. A partir de plomo metálico o con carbonato de plomo se lleva a cabo la fundición del residuo, de manera que el oro, platino y paladio restantes en el residuo puedan ser lixiviados con agua regia y los elementos secundarios más refractarios queden en el residuo [11]. Posteriormente, se obtiene una disolución que contiene el rutenio y el osmio a partir de un tratamiento con peróxido de hidrógeno, usando como disolvente el ácido clorhídrico. Debido a que los tetróxidos de rutenio y el osmio son muy volátiles, es necesaria una recuperación cuantitativa a partir de una destilación, recuperándolos en ácido clorhídrico; el osmio permanece como tetróxido, mientras que el rutenio se reduce a Ru (VI), por lo tanto, se puede reestilar y llevar a cabo la separación. Para separar iridio y rodio, es necesario la precipitación de iridio como complejo hexacloroiridiato de amonio, dejando en la disolución al rodio para que posteriormente, precipite en forma del complejo $[\text{Rh}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ [11].

Como se ha venido reportando, la recuperación de MGP se lleva a cabo por lixiviación ácida y son separados por precipitación. Sin embargo, existen otras tecnologías para su recuperación, por ejemplo, la biosorción la cual resulta ser una alternativa viable. Puesto que en este trabajo se hará hincapié al proceso de biosorción, en seguida se precisan los fundamentos más importantes.

2.3. Adsorción de metales preciosos y platinoides

2.3.1 Mecanismo general de adsorción

Una expresión general para un proceso en el cual un componente se mueve de una fase para ser acumulado en otra, particularmente si esta otra fase es sólida, se conoce como sorción, este término incluye a los procesos de adsorción, biosorción, absorción e intercambio iónico [14].

El proceso de unión y remoción de ciertas sustancias de una solución a partir de un adsorbente se conoce como Adsorción. Las interacciones físicas (fisorción) y químicas (quimisorción) mediante las cuales una molécula se adhiere a una superficie son los principales mecanismos de la adsorción. Por lo general, la fisorción involucra fuerzas electrostáticas e intercambio de iones, debido a que no hay una transferencia de electrones entre ellos, lo que conlleva a una polarización del adsorbato y la superficie. La quimisorción incluye complejación, quelación e intercambio iónico, en este mecanismo, tanto el adsorbente como la especie metálica requieren altas energía de enlace. Las moléculas de soluto y los grupos funcionales de la superficie forman enlaces químicos que son altamente direccionales. Por consiguiente, se adhieren en sitios específicos los adsorbatos quimisorbidos (quimisorbatos) y muestran una interacción de unión que depende de su posición y orientación exactas con respecto al sustrato. Al contrario de los quimisorbatos, las especies fisorbidas (fisorbatos), tienen una interacción atractiva con la superficie, ya que se adhieren más débilmente a sitios específicos. Lo que resulta en algunos casos, que las interacciones entre fisorbatos son más fuertes que la interacción con la superficie [14].

Según el metal y el material utilizado como sorbente, va depender el mecanismo de sorción. En la biosorción de iones metálicos puede presentarse más de un mecanismo de sorción, debido a la estructura compleja que presentan los diversos biosorbente [15].

2.3.2. Mecanismos generales de biosorción mediante microorganismos.

Existe una gran variedad microbiana, dentro de esta hay microorganismos tolerantes o resistentes a iones metálicos. Gracias a la acción de diferentes mecanismos es posible la tolerancia o resistencia por parte de ciertos microorganismos. Estos mecanismos son: biosorción, bioacumulación,; biomineralización, biotransformación y quimisorción mediada por microorganismos [16] (Figura 2.1).



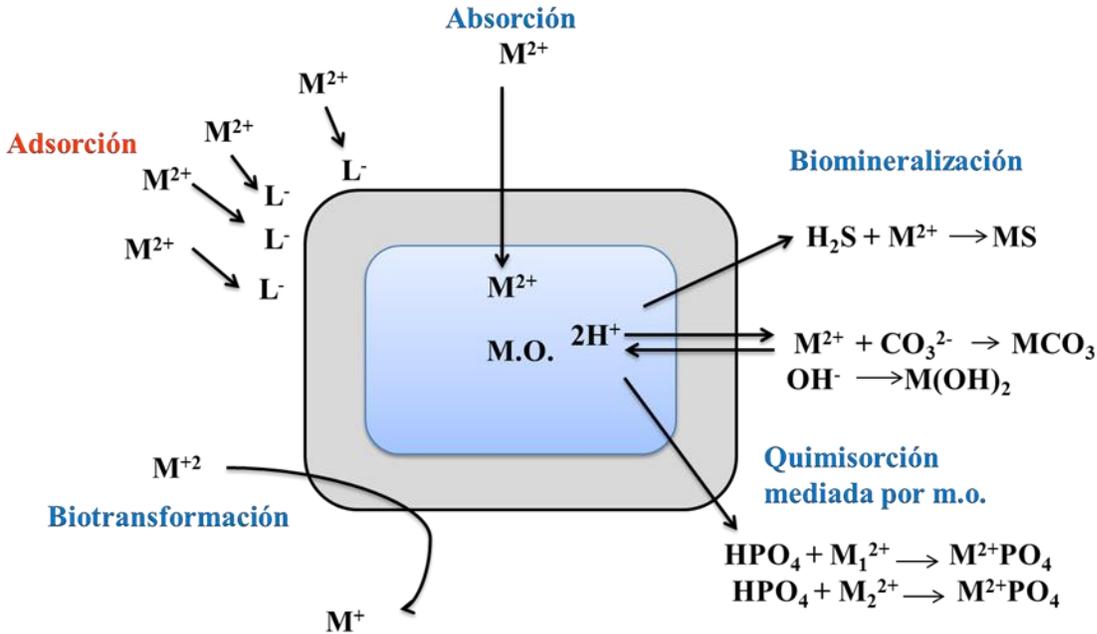


Figura 2.1. Mecanismos de interacción entre metales pesados y microorganismos [16].

En el caso de los microorganismos, los mecanismos para la unión de los iones metálicos a la pared celular se clasifican según la dependencia del metabolismo en dependiente del metabolismo e independiente del metabolismo [15].

- ✓ Proceso dependiente del metabolismo. Se lleva a cabo en las biomasas vivas.

En el proceso de biosorción dependiente del metabolismo se encuentra principalmente el transporte a través de la membrana celular, ya que la acumulación intracelular debida al transporte del metal a través de la membrana celular depende del metabolismo de las células viables y se atribuye al sistema de defensa activo de los microorganismos. Sin embargo, el microorganismo requiere de un cierto tiempo para reaccionar ante la presencia de un metal tóxico, por lo cual la reacción no es inmediata [15].

- ✓ Proceso independiente del metabolismo. Se lleva a cabo en las biomasas muertas principalmente.

Dentro de la sorción de la superficie celular que no depende del metabolismo se tiene la interacción fisicoquímica entre los grupos funcionales presentes en la pared celular y los iones metálicos, basándose en la adsorción física, el intercambio iónico y la complejación (Figura 2.2). Las paredes

celulares de los microorganismos, se componen de carboxilato, hidroxilo, grupos sulfato, fosfato y amino, provenientes principalmente de polisacáridos, proteínas y lípidos presentes en la biomasa microbiana. Este proceso independiente del metabolismo es reversible y rápido [17].

Otra clasificación de la biosorción que depende del sitio donde se encuentra el metal removido de la solución son [15]:

- ✓ La acumulación/precipitación extracelular
- ✓ Sorción/precipitación en la superficie celular
- ✓ Acumulación intracelular.

En esta clasificación, la precipitación puede o no depender del metabolismo del microorganismo. En el primer caso el microorganismo genera compuestos que son favorables para propiciar el proceso de precipitación. Por el contrario, en el segundo caso, hay una interacción química entre el metal y la superficie celular sin depender del metabolismo de la célula [15].

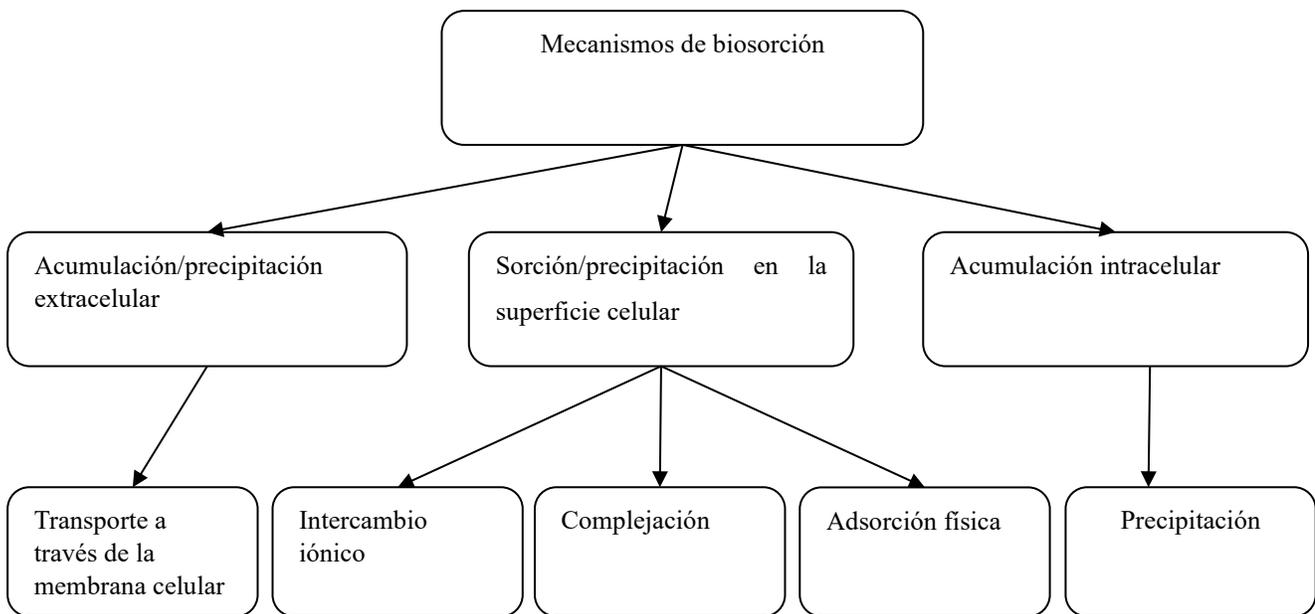
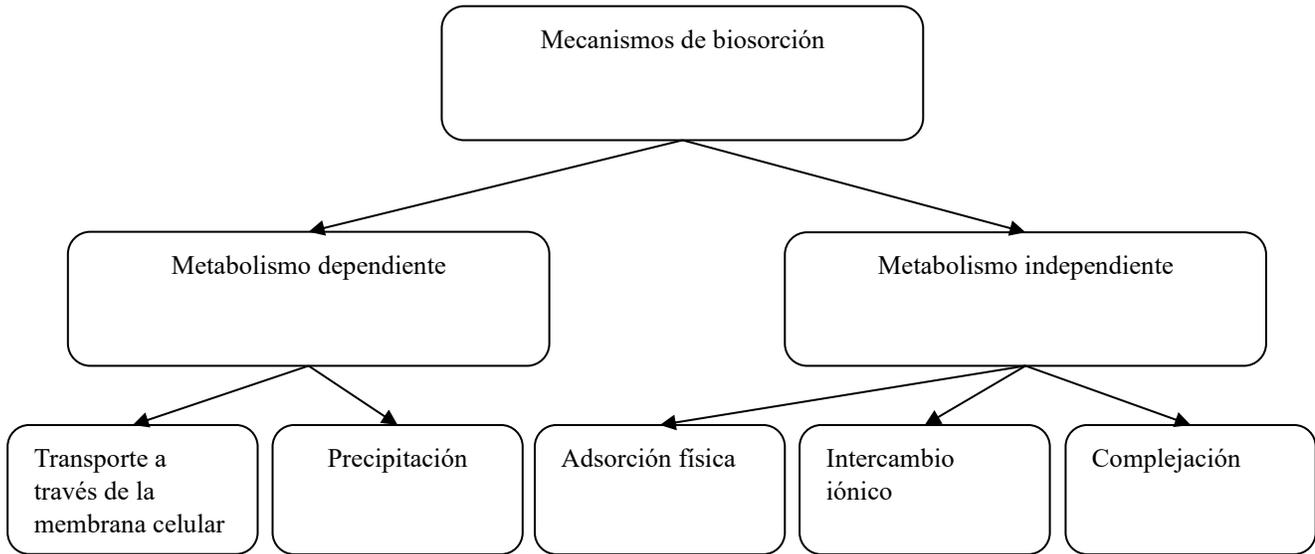


Figura 2.2. Mecanismos de biosorción. a) Clasificados según la dependencia del metabolismo de las células. (b) Clasificados según el lugar donde se encuentre el metal removido [15].

Los principales mecanismos se describen a continuación:

- **Transporte a través de la membrana celular.** Debido a la escasa información acerca del transporte de metales pesados a través de la membrana celular de los microorganismos se cree que los iones metálicos son transportados de manera similar al transporte metabólico de los iones como potasio, magnesio y sodio (iones esenciales). El transporte de iones metálicos se puede ver afectado por la presencia de iones metálicos con el mismo radio y carga [15]. Este proceso es independiente del metabolismo ya que ocurre a la par con los fenómenos de biosorción y es adherido a las paredes celulares, es decir, no es intracelular [15].
- **Adsorción física.** Es un fenómeno superficial producido por fuerzas de Van der Waals (fisisorción) o enlaces covalentes (quimisorción). En la superficie del adsorbente se crea una película del adsorbato [18]. En este proceso los átomos y moléculas que se encuentran en el interior de un cuerpo sólido están rodeados completamente por otros, por lo tanto, sus fuerzas atractivas están satisfechas por todos lados. Por otro lado en la superficie de los sólidos se encuentran átomos y moléculas con fuerzas atractivas parcialmente equilibradas, lo que da lugar al fenómeno de adsorción, debido a que otros átomos y moléculas se unen a la superficie neutralizando a las fuerzas atractivas [19].
- **Intercambio iónico.** En este mecanismo, los iones metálicos divalentes se intercambian con los contraiones de los polisacáridos de la biomasa [19]. Los polisacáridos se encuentran en las paredes celulares de los microorganismos como un componente básico [15]. La mayoría de los sorbentes contienen en su estructura sales de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . Los iones metálicos quedan unidos al material debido a que pueden ser intercambiados por los cationes provenientes de las sales [19].
- **Complejación.** Después de la interacción entre el metal y los grupos activos presentes en la pared celular de la biomasa, se lleva a cabo la formación de complejos mediante enlaces químicos [19].
- **Precipitación.** Se asocia a la formación de un complejo en la pared celular de la biomasa y en seguida es hidrolizado [20]. Este mecanismo puede o no depender del metabolismo celular del microorganismo. En el caso de ser dependiente del metabolismo, se asocia la remoción del metal de la solución a un sistema activo de defensa por parte de los microorganismos, favoreciendo la precipitación a partir de la producción de compuestos.

En las precipitaciones no dependientes del metabolismo celular es debida a la interacción química entre la superficie celular y el metal, seguido por la hidrólisis en la pared celular [15].

2.3.3 Mecanismos de biosorción con biomasas fúngicas

Los hongos pueden utilizarse como biosorbentes de metales, tanto vivos como muertos, debido a las buenas propiedades de unión a metales [21, 22]. La recuperación de metales a partir de hongos incluye 1) captación activa o bioacumulación o captación intracelular (depende del metabolismo celular) y 2) biosorción o captación pasiva que implica la unión de iones metálicos a la superficie de la pared celular (independiente del metabolismo celular) [18].

Los mecanismos mayormente encontrados con biomasa fúngicas según son adsorción física, intercambio iónico y formación de complejos.

Tsezos y Volesky [21, 22]., utilizaron la biomasa fúngica de *Rhizopus arrhizus* para la recuperación de torio y uranio, y verificaron que la biosorción se basa en la adsorción física en la estructura de quitina de la pared celular del hongo. Para ambos metales el mecanismo de secuestro fue estudiado utilizando microscopía electrónica, análisis de dispersión de energía de rayos X, espectroscopía de infrarrojo (IR). El nitrógeno de la red de la pared celular de quitina se coordina con el torio y, por la sección externa de la pared celular fúngica se absorbe más torio, a un pH óptimo de biosorción de 4. En el caso del uranio, de manera simultánea y rápida se produce la coordinación y la adsorción del uranio en la estructura de quitina de la pared celular, y a un ritmo menor tiene lugar la precipitación del hidróxido de uranilo dentro de la estructura microcristalina de la pared celular de quitina. La biosorción de torio y uranio a partir de la biomasa fúngica fue de 170 mg/g y 180 mg/g respectivamente.

Akthar y col. [23], descubrieron que el biosorbente tratado con álcali (*Aspergillus niger*) secuestra de forma eficiente iones metálicos (Cd^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} y Co^{2+}) hasta el 10% de su peso (p/p), así como de soluciones diluidas como concentradas. La cinética de la unión de metales por la biomasa fúngica, indicó la eliminación del metal (70-80%) en sólo 5 minutos, seguido de una velocidad más lenta. El mecanismo de intercambio iónico es el que propicia la unión de metales debido a la liberación de concentraciones equimolares de los iones Ca^{+} y Mg^{1+} en el medio. Esto se llevó a cabo, suspendiendo 2 g de la biomasa fúngica en una solución de Cd^{2+} 50 mM (20 ml). La

unión del metal con la biomasa fúngica es acompañada de una liberación estequiométrica de iones Ca^{2+} más Mg^{2+} .

2.3.4 Equilibrio de biosorción

En el proceso de biosorción, para ocupar completamente los sitios de adsorción las moléculas del sorbato, se difunden dentro de las partículas, para ocupar completamente los sitios de biosorción. Diferentes mecanismos de difusión son los dominantes en el proceso, dependiendo de la estructura del adsorbente y en ocasiones cooperan o compiten entre ellos. Las condiciones a las cuales se lleva a cabo el proceso, como la temperatura y la concentración, así como el mecanismo dominante depende del sistema adsorbato-adsorbente en cuestión [14].

A continuación, se describen las cuatro etapas cinéticas para llevar a cabo la adsorción de un adsorbato [24]:

- Desde el seno de la fase líquida hacia la película líquida que rodea el adsorbente, se lleva a cabo la transferencia del adsorbato.
- Transferencia del adsorbato a través de la película líquida hacia la superficie del adsorbente. Caracterizada por un parámetro inversamente proporcional a la resistencia ejercida por la película externa a la transferencia de la masa conocido como coeficiente de transferencia de masa global externa (k_f).
- Difusión del adsorbato en el adsorbente, bajo los efectos del gradiente de concentración. Esta difusión se puede hacer: en estado libre, en el líquido intraparticular (el coeficiente de difusión porosa D_p , caracteriza esta migración); o en estado combinado, de un sitio de adsorción a otro adyacente (el coeficiente de difusión superficial D_s , es específico en esta etapa).
- Adsorción. Se caracteriza por ser el sistema de más baja energía, y por las interacciones adsorbato-adsorbente, que pueden ser: fisisorción, quimisorción o sorción electrostática (fuerzas más intensas que afectan a las moléculas cargadas, se derivan de las interacciones electrostáticas entre las cargas localizadas). Las cinéticas y equilibrio de adsorción verifican la complejidad de los sorbentes.

2.3.5 Modelado cinético

Mediante diferentes modelos se pueden evaluar y describir a partir de ecuaciones matemáticas los procesos de adsorción. En la actualidad, hay una variedad de modelos matemáticos que determinan los parámetros cinéticos, siendo los de mayor relevancia el modelo de primer orden y el de pseudo-segundo orden.

En la ecuación de primer orden o de Lagergren se basa en la capacidad de adsorción del sólido (adsorbente), donde a cada ion metálico se le asigna un sitio de adsorción del material adsorbente [25, 26].

$$q_t = q_e(1 - e^{-K_L t}) \quad (1)$$

Donde:

q_e = concentración de soluto removido en el equilibrio por cantidad de adsorbente (mg/g)

q_t = concentración de soluto removido en tiempo t por cantidad de adsorbente (mg/g)

K_L = constante de velocidad en el equilibrio de pseudo primer orden (min^{-1})

t = tiempo (min)

El modelo de pseudo-segundo orden, se basa en la suposición que el adsorbato se adhiere a dos diferentes sitios activos de la biomasa [25], [26]. Se expresa con la siguiente ecuación:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2)$$

Donde:

q_t = concentración del metal adsorbido (mg/g).

t = tiempo (min).

q_e = concentración capacidad de biosorción en equilibrio (mg/g).

k_2 = constante de la ecuación (g/mg min).

2.3.6. Isotermas de adsorción

Los modelos de Langmuir y el de Freundlich son los más utilizados para evaluar la información de equilibrio. La isoterma de Langmuir describe la adsorción en fase gas-sólida y cuantifica la capacidad de adsorción de varios adsorbentes [27]. Y se representa con la siguiente fórmula:



$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (3)$$

Donde:

C_e = concentración de adsorbato en equilibrio (mg g^{-1}).

K_L = Se relaciona con la capacidad de adsorción (mg g^{-1}) y es la constante de Langmuir, se asocia con la porosidad del adsorbente y la variación del área, esto involucra mayor capacidad de adsorción, debido a una mayor superficie y volumen de poros. A partir de una constante adimensional denominada factor de separación R_L se expresan la singularidad de la isoterma de Langmuir [28]:

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (4)$$

Donde

K_L = constante de Langmuir (mg g^{-1})

C_0 = Concentración inicial de adsorbato (mg g^{-1}).

Los valores referenciados muestran que la adsorción es desfavorable cuando $R_L > 1$, lineal cuando $R_L = 1$, favorable cuando $0 < R < 1$, e irreversible cuando $R_L = 0$.

Para los procesos de adsorción que ocurren en superficies heterogéneas se aplica la isoterma de Freundlich [26], [28]. Esta isoterma supone que la fuerza de enlace disminuye cuando los sitios de adsorción son ocupados. La isoterma de Freundlich es la siguiente:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (5)$$

Donde

K_F = indica la distribución relativa de la energía y la heterogeneidad de los sitios de adsorción.

Además de ser la capacidad de adsorción e intensidad de adsorción.

q_e = concentración de soluto removido en el equilibrio por cantidad de adsorbente (mg/g)

$1/n$ = Exponente de no linealidad

2.3.7 Aspectos termodinámicos

La cantidad fundamental termodinámicamente es la energía de Gibbs (ΔG). Cualquier sistema, mientras no existan restricciones dinámicas o cinéticas que le impidan alcanzar el equilibrio global,

se relajará al estado de energía de Gibbs más baja. Por lo tanto, $\Delta G < 0$ para todos los procesos espontáneos, es debido a que un cambio espontáneo siempre va acompañado de una disminución de la energía de Gibbs [14]. En termodinámica, en base al concepto fundamental, un sistema aislado no puede ganar o perder energía, y la única fuerza motriz es el cambio de la entropía. Con el cálculo de estos dos factores, es posible determinar la espontaneidad de un proceso. Los cambios de entalpía y entropía se obtendrán respectivamente de la pendiente e intercepto de la gráfica lineal de $\ln K_d$ con respecto a $1/T$ de la ecuación:

$$\ln K_d = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT} \quad (6)$$

Donde:

$$K_d = q_e/C_e$$

T = temperatura en Kelvin

ΔS = cambio en la entropía

ΔH = cambio en la entalpía

R = constante de los gases ideales.

El cambio en la energía libre de Gibbs se calcula por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (7)$$

La energía libre de Gibbs se puede calcular por medio de:

$$\Delta G = -RT \ln K_d \quad (8)$$

2.3.8 Biosorbentes

Para la recuperación de metales preciosos, una tecnología prometedora es la biosorción, debido a que cierta biomasa microbiana inactiva o muerta, presenta propiedades que confieren la unión y concentración de iones metálicos de soluciones acuosas y efluentes industriales [5]. Este tipo de biomazas son económicas y considerablemente disponibles. Este proceso tiene lugar en la pared celular de los microorganismos [6], y según el tipo de biomasa, difiere el mecanismo de absorción de metales [7]. Las algas, los hongos, las bacterias, los actinomicetos, la levadura, entre otros, junto con algunos biopolímeros y materiales de bioresiduos representan la gran variedad de biomateriales, que son capaces de unir o remover los metales preciosos [7].

Este tipo de biomasa se ha venido aplicando cada vez más en los últimos años y ha mostrado buenos resultados para la adsorción de iones metálicos.



Savvaidis [29], investigó la recuperación de oro utilizando *Saccharomyces cerevisiae*, *Spirulina platensis* y *Streptomyces erythraeus*, a partir de soluciones de oro-tiourea. Todos los microorganismos utilizados, removieron el oro de las soluciones de oro-tiourea. La recuperación de oro fue independiente del pH para *Spirulina platensis*, caso contrario para *Saccharomyces cerevisiae* y *Streptomyces erythraeus* que estos microorganismos fueron dependientes con un pH de 4. Los resultados obtenidos demostraron *Spirulina platensis* tenía una mayor afinidad y capacidad de recuperación de oro que *Saccharomyces cerevisiae* y *Streptomyces erythraeus* con $5.55 \cdot 10^3 \text{ mgg}^{-1}$ y 2.54 mM^{-1} , 5.55 mgg^{-1} y 0.51 , 6.0 mgg^{-1} y 0.93 mM^{-1} , respectivamente.

Mata y col. [30] analizaron la capacidad de biorreducción de Au (III) a Au (0), a partir del alga *Fucus vesiculosus*. El proceso de recuperación y reducción de oro se llevó a cabo en dos etapas (pH óptimo 4-9). La primera etapa duró aproximadamente 1 hora y no hubo coloración, debido a que la variación de pH, potencial redox y la concentración de oro en solución era despreciable; en la segunda etapa el equilibrio final de la concentración del metal, se alcanzó a las 8 horas y se distinguió por un cambio en la coloración de amarillo brillante a púrpura en la solución. Los grupos involucrados en la biorreducción de oro presentes en los polisacáridos, fueron los grupos hidroxilo. Detectaron oro metálico en la superficie de la biomasa como microprecipitados y como nanopartículas (forma coloidal) en la solución.

Gomes y col.,[31] a partir de un líquido de lixiviación que contenía metales y concentraciones considerables de cianuro proveniente de una planta de extracción de oro, aislaron una cepa de *Aspergillus niger*, la cual se adaptó y desarrolló favorablemente en este medio. Los metales presentes en el lixiviado, eran oro, plata, hierro y cobre; para lograr el crecimiento de la biomasa fúngica se enriqueció el líquido. La recuperación de metales por *Aspergillus niger* fue de un 62.42% de oro, 100% de plata, 58.74% de cobre, 80.34% de hierro y 73.68% de zinc.

Akthar y col. [23]. Aislaron una cepa de *Aspergillus niger* seleccionado por su capacidad para crecer en placas de agar que contienen una concentración tóxica de metal (10 mM Cd^{2+}) y *Neurospora crassa* (FGSC# 4200) y *Fusarium oxysporium* (FGSC# 6607), cepas obtenidas del Fungal Genetics Stock Centre, Kansas City, EE. UU. Para la recuperación de plata se realizaron experimentos tipo lote, donde se pusieron en contacto 2 gramos de la biomasa con 25 mililitros de la solución de plata durante 60 minutos a 100 rpm a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ en un girador rotatorio. La biomasa se separó por centrifugación y el sobrenadante fue analizado por Espectrofotometría de absorción

(AAS Perkin-Elmer modelo No. 2380). Los resultados obtenidos revelaron que la biomasa procesada con álcali de *Aspergillus niger* (98.75 mg/g peso seco) fue más eficiente que la de *Neurospora* (68.25 mg/g peso seco) o *Fusarium* (57.50 mg/g peso seco) para la recuperación de plata. Cabe señalar que la biosorción se llevó a cabo a un pH de 5-7.

De Vargas y col.[32], cultivaron tres especies diferentes de *Desulfovibrio*: *Desulfovibrio desulfuricans*, *Desulfovibrio fructosivorans* y *Desulfovibrio vulgaris*, evaluarón diferentes parámetros, como el pH, el fondo ácido y los aniones competidores en los equilibrios de biosorción y la cinética de biosorción lo que determinó diferencias entre las tres especies, en cuanto afinidad y máxima capacidad de sorción, dependientes de la especiación del metal involucrados. Los resultados obtenidos demostraron que la biomasa correspondiente a *Desulfovibrio desulfuricans* presenta un mejor comportamiento para la remoción de ambos metales con un valor máximo de 190 mg g⁻¹ de biomasa seca para Pd y 90 mg g⁻¹ de biomasa seca para la acumulación de Pt a pH 3.

En la Tabla 2.1 se resumen ejemplos de microorganismos como biosorbentes de metales preciosos:

Tabla 2.1. Ejemplos de microorganismos como biosorbentes de metales preciosos.

Biosorbente	Metal	pH	Capacidad de biosorción	Referencia
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Au ³⁺	5.0	0.026 mmol/g	[29]
<i>Spirulina platensis</i>		4.0	0.026 mmol/g	
<i>Streptomyces erythraeus</i>		4.0	0.03 mmol/g	
<i>Fucus vesiculosus</i>	Au ³⁺	7.0	0.35 mmol/g	[30]
<i>Aspergillus niger</i>	Ag	5-7	0.9 mmol/g	[31]
<i>Neurospora crassa</i>		5-7	0.6 mmol/g	
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	Pt ⁴⁺	2.0	0.32 mmol/g	[33]
<i>Desulfovibrio fructosivorans</i>		2.0	0.17 mmol/g	

<i>Desulfovibrio vulgaris</i>		2.0	0.17 mmol/g	
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	Pd ²⁺	2.0	1.2 mmol/g	[32]
<i>Desulfovibrio fructosivorans</i>		2.0	1.0 mmol/g	

La literatura tiene escasos reportes sobre la biosorción de platino a partir de microorganismos puesto que la mayoría de las investigaciones está dirigida a la utilización de biomasa lignocelulósica y de organismos marinos, sin embargo en 2020, Godlewska y col. [34], reportaron la eliminación de platino y paladio de aguas residuales mediante biosorción con *Aspergillus sp* (hongo) y *Saccharomyces sp* (levadura), se aislaron y cultivaron durante 72 y 96 horas respectivamente; se mejoraron condiciones como pH de la solución, la masa de biosorbente y el tiempo de contacto, de acuerdo a las necesidades de cada microorganismo. La retención con máxima eficiencia para Pt (IV) tanto para levaduras y hongos, se obtuvo a pH 2.0 para Pt (IV) y pH 2.5–3.5 para Pd (II); mientras que a los 45 minutos se alcanzó el tiempo de equilibrio del proceso de biosorción. Los resultados obtenidos revelaron que para ambos metales el *Aspergillus sp.* muestra una mayor capacidad de adsorción que la levadura *Saccharomyces sp.*, con 5.49 mg g⁻¹ para Pt (IV) y de 4.28 mg g⁻¹ para Pd (II).

2.4 *Aspergillus niger*

Aspergillus niger, es un hongo ascomiceto filamentoso que crece sobre materia orgánica aeróbicamente, bajo amplias condiciones de pH que va desde 1.4-9.8, temperatura de 6 a 47 °C (óptima de 35-37°C) y 0.88 de actividad de agua como límite [35]. Las colonias formadas por *Aspergillus niger* presentan características morfológicas macroscópicas (Agar Papa Dextrosa (APD), como micelio bien desarrollado, ligeramente algodonoso y septado, hialino con abundantes ramificaciones, hifas multinucleadas y predominantes conidios de color negro (Figura.2.3) Cuenta con microconidios, conidióforo, fiálide y vesícula (Figura. 2.4) [36].

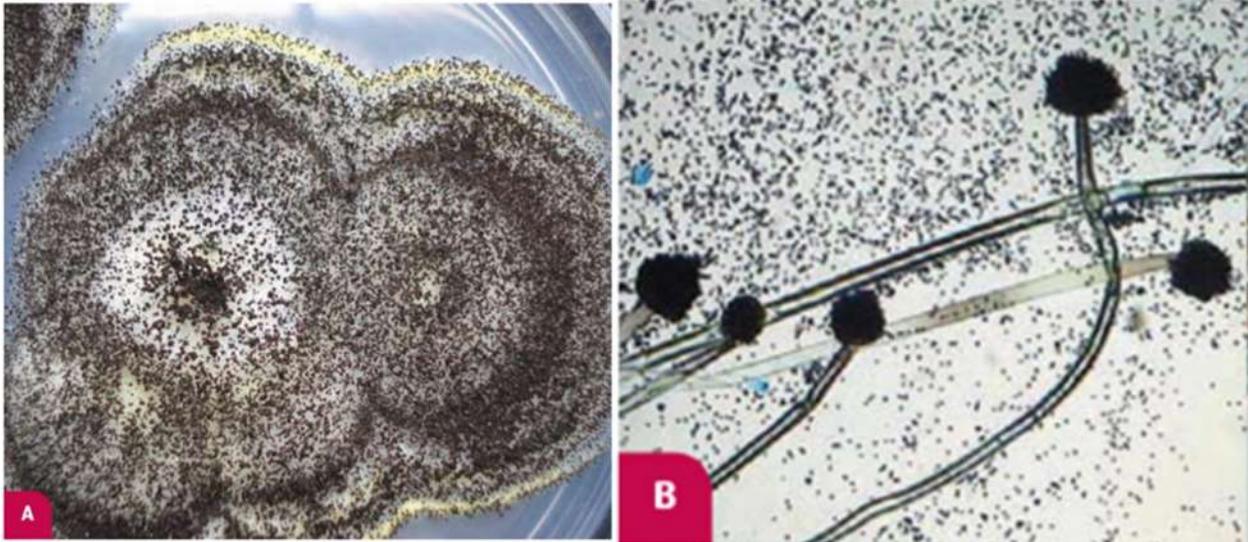


Figura 2.3. A Cultivo de *Aspergillus niger*. B *Aspergillus niger*. Izquierda (10X) [36].

- Microconidios: se presentan de diferentes formas y son unicelulares, generalmente crean cadenas (catenuladas) y se encuentran en muchos hongos mohos o filamentosos como el *Aspergillus niger*.
- El conidióforo, es una hifa especializada o prolongación del talo que soporta a los conidios.
- Fiálide: tiene forma “de botella” y es la estructura que nace del micelio y que internamente produce conidios, y los expulsa cuando éstos alcanzan su madurez.
- Vesícula, tiene forma bulosa o de burbuja, es la prolongación del conidióforo y es propia del género *Aspergillus* [36].

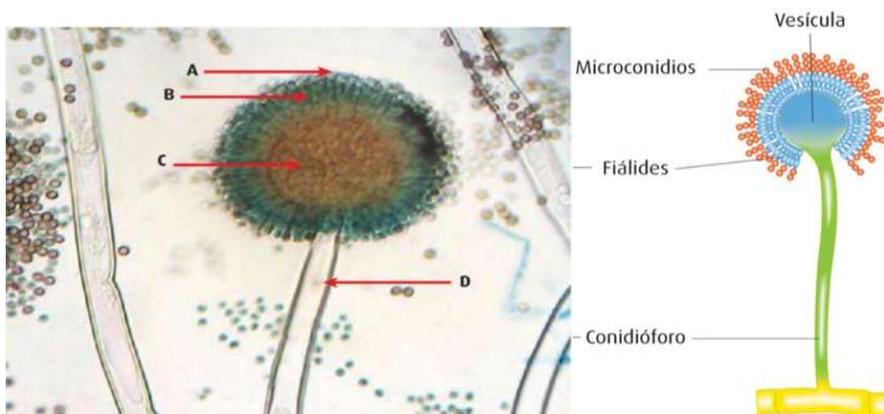


Figura 2.4. *Aspergillus niger*. A microconidios; B fiálides; C vesícula; D conidióforo (azul de algodón, 40X) [36]

La pared celular fúngica es una barrera que protege a la célula y presenta gran plasticidad en su estructura. Además, permite la interacción con el medio externo, cuenta con adhesinas que junto con un gran número de receptores inducen señales en el interior de la célula. Los principales componentes de la pared celular del hongo son proteínas y polisacáridos [37]. Básicamente la pared celular está formada por quitina a (N-acetilglucosamina), glucanas, mananas y derivados celuloideos (polisacáridos), éstos compuestos le proporcionan gran rigidez; además los glucopéptidos y manoproteínas son de gran importancia para su taxonomía y propiedades antigénicas y proporcionan cierto grado de flexibilidad [36]. Por lo general, los polisacáridos están asociados con las proteínas y por consiguiente se forman las glicoproteínas.

- Glicoproteínas. La formación de las glicoproteínas se da debido a que gran parte de las proteínas está asociada a glúcidos por enlaces O ó N. Las proteínas de la pared tienen una variedad de funciones, interviniendo en los procesos de adhesión (Als y Hwp1), participan en el mantenimiento de la forma celular, protegen a la célula de sustancias extrañas, remodelan los componentes de la pared, transmiten señales al citoplasma y, además, participan en la absorción de moléculas. Cabe señalar, que el peso seco de la pared de los hongos filamentosos es el 20-30% y lo representan las proteínas [38].
- Quitina. Según la fase morfológica del hongo el contenido en quitina de la pared fúngica varía. El peso seco de la pared celular en los hongos filamentosos representa el 10-20%. La quitina se sintetiza por la enzima quitin sintasa a partir de N-acetilglucosamina, los polímeros de quitina son depositados en el espacio extracelular próximo a la membrana citoplásmica [39].
- Glucano. El peso seco de esta estructura va del 50-60%, estructuralmente es el polisacárido más importante de la pared celular. Los polímeros de glucano en su mayoría se componen de unidades de glucosa con uniones β -1,3 (65-90%). El componente más importante debido a que se unen covalentemente otros componentes de esta estructura, es el β -1,3-D-glucano [37] (Figura 2.5).

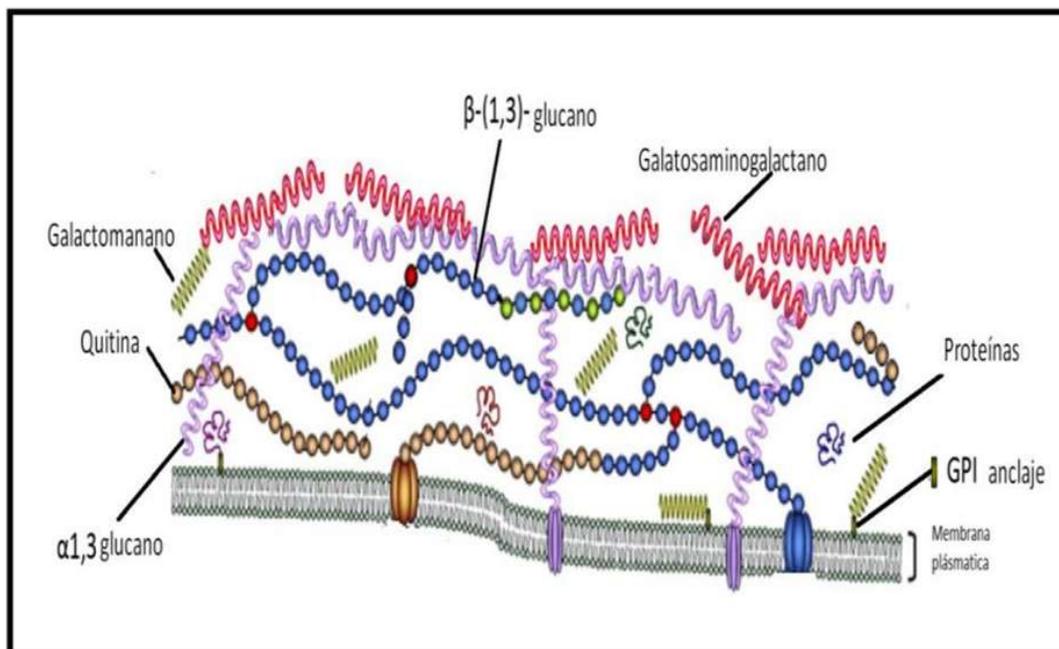


Figura 2.5. Estructura y composición de la pared celular de un hongo. Modificado de Beauvais y col., por Yamily Burgos [40],[41].

Aspergillus niger, es un hongo ampliamente distribuido en la naturaleza, y no es considerado como patógeno. A diario los seres humano se exponen a las esporas de este hongo sin manifestar clínico, ya que el hospedero generalmente es un paciente inmunocomprometido [42].

Aspergillus niger, es uno de los microorganismos de mayor importancia utilizado en la biotecnología [42], durante varias décadas ha venido teniendo diversas aplicaciones industriales, como es la producción de ácido cítrico, ácidos glucónico y fumárico [42], siendo conocido principalmente como productor de ácido cítrico, con más de un millón de toneladas métricas producidas al año [43]. El ácido cítrico es aplicado en industrias de alimentos y bebidas como acidulante de jugos de fruta, refrescos, mermeladas, dulces, entre otros; en la industria farmacéutica como conservador de la sangre almacenada, en la fabricación de productos de tocador y cosméticos como antioxidante y tampón para ajustar el pH, etcétera.

En este trabajo, fue considerada la cepa de *Aspergillus niger* ya que es un microorganismo generalmente reconocido como seguro (GRAS) [44]. Por lo tanto, se pretende utilizar una cepa certificada que este avalada por pruebas morfológicas, bioquímicas y moleculares como un cultivo

puro considerándose el cultivo de *Aspergillus niger* 16404, perteneciente a American Type Culture Collection de Rockville, EUA.



CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El trabajo experimental se dividió en tres etapas, cada una alcanzando un objetivo particular, y siendo el soporte o condición para el planteamiento de la siguiente etapa.

3.1 ETAPA I. Caracterización del Mineral y de la Biomasa.

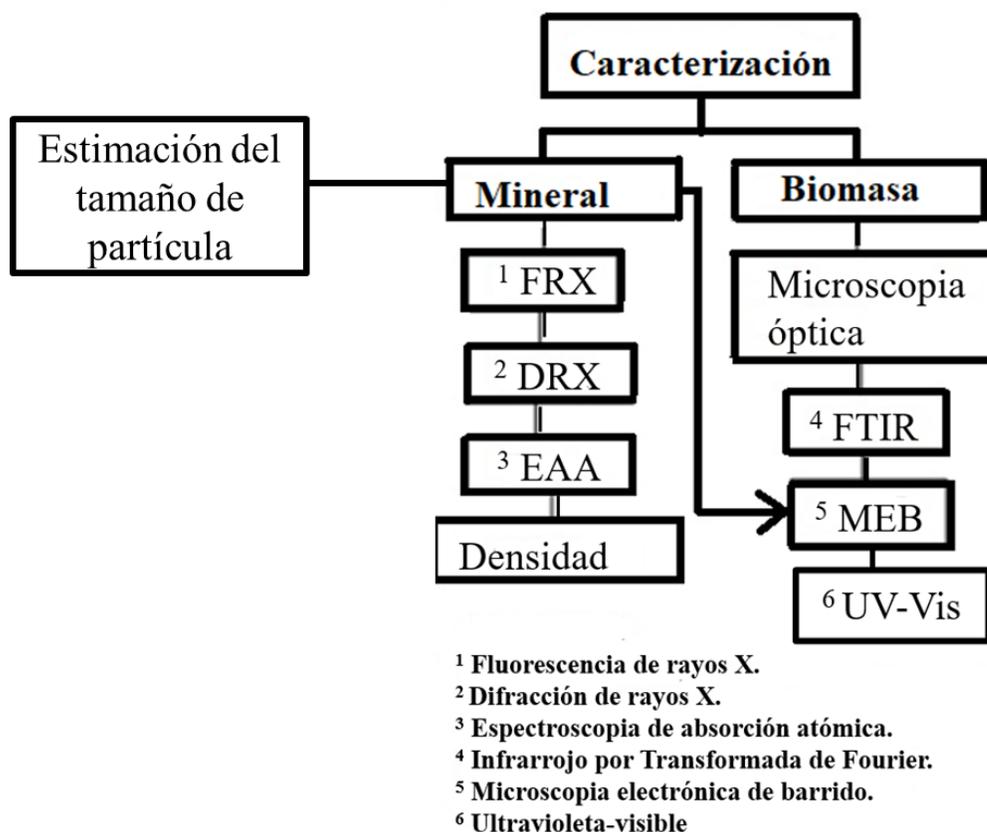


Figura 3.1. Diagrama de bloques de la Etapa 1. Caracterización del mineral y de la biomasa.

3.1.1. Caracterización del Mineral.

3.1.1.1. Distribución del tamaño de partícula del mineral y D80.

Se seleccionaron una secuencia de mallas: 80 (182 μm), 100 (146 μm), 150 (98 μm), 200 (74 μm); se colocó el mineral dentro de la malla superior (malla 80) y se tapó para someterse a agitación durante veinte minutos. Posteriormente, se retiró la secuencia de malla de la base de agitación y se desmontaron las mallas, se retiró el mineral de cada malla y se pesaron por separado (Figura 3.1).

3.1.1.2. Difracción de rayos X (DRX)

El mineral de cabeza se analizó mediante Difracción de rayos X (DRX), con el difractómetro D8 ADVANCE BRUKER, con el objetivo de identificar las fases minerales (Figura 3.1).

3.1.1.3. Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Utilizando el equipo de Fluorescencia de Rayos X (FRX) se identificaron los elementos presentes en el mineral (espectrómetro S8 TAIGER TIGER BRUKER) (Figura 3.1).

3.1.1.4. Absorción atómica

Mediante Espectroscopía de Absorción Atómica (EAA) (Figura 3.1), se cuantificaron los metales contenidos en las muestras del mineral (previamente digeridas) y en las soluciones después del contacto hongo-solución. El equipo utilizado fue EAA – PinAacle 900H Perkin Elmer.

3.1.1.5. Densidad

Se estimó la densidad del mineral (Figura 3.1) con el picnómetro de agua, de acuerdo a lo establecido en la norma estandarizada INV E-707-07 [45], en la que se establece la metodología descrita a continuación:

1. Llenar el picnómetro con agua destilada, colocar la tapa para eliminar excedente de agua y pesar.
2. Pesar la muestra del mineral.
3. Agregar el mineral dentro del picnómetro, agregar agua hasta llenar, tapar y pesar.

Este procedimiento se repitió tres veces y se reportó el promedio de la densidad como resultado a partir de la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{W}{V} \quad (3.1)$$

Donde

ρ : Densidad del mineral.

W: Peso del mineral.

V: Volumen de agua desplazado por el mineral en el picnómetro.



Para calcular el volumen de agua desplazado por el mineral en el picnómetro se utiliza la siguiente fórmula:

$$V=W_3-W_2 \quad (3.2)$$

Donde

W_3 = Peso del picnómetro aforado con agua + peso del mineral.

W_2 : Peso del picnómetro con el mineral y el volumen de agua desplazado.

3.1.1.6. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Se aplicó la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido con un equipo JEOL JSM-7600F FEG-SEM (Figura 3.1), para la identificación morfológica del mineral, y para realizar microanálisis puntuales para la detección de metales preciosos y platinoides; previamente las muestras se metalizaron con cobre para hacerlas conductoras de los electrones.

3.1.2. Biomasa.

3.1.2.1. Microscopía óptica

Se llevó a cabo Microscopia óptica con un microscopio óptico marca Olympus, con el objetivo de analizar y observar la morfología microscópica del hongo *Aspergillus niger* (Figura 3.1).

3.1.2.2 Espectroscopía de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR)

Se llevó a cabo un análisis por Espectroscopía de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR) (Figura 3.1), equipo Bruker, modelo Tensor 27. Serán preparadas las muestras en pastillas de KBr (Sigma-Aldrich, grado espectroscópico). Se obtuvieron los espectros en un rango de $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ con resolución de 4 cm^{-1} , lo que permitió la identificación de los grupos funcionales de la biomasa fúngica, se hizo una comparación entre la biomasa antes y después de la adsorción del ion metálico.

3.1.2.3. Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Como técnica de apoyo, para la identificación de cambios morfológicos de la biomasa antes de la adsorción del metal se realizó Microscopia Electrónica de Barrido con un equipo JEOL JSM-7600F FEG-SEM mediante una micrografía, y posteriormente después de la adsorción del metal

se repitió el análisis y, además se llevó a cabo un microanálisis para la detección del metal adsorbido.

3.1.2.4. Espectroscopía UV-vis

El sobrenadante de la solución metálica que estuvo en contacto con la biomasa muerta de *Aspergillus niger* se analizó en un espectrofotómetro de UV-Vis en la longitud de onda 570 nm, para identificar las especies de oro y de platino formadas en las soluciones acuosas sintéticas.

3.1.2.5. Absorción atómica

Por medio del método de absorción atómica, durante el contacto microorganismo-solución metálica, se recolectaron muestras de la solución residual para cuantificar los contenidos de metales preciosos residuales en la solución metálica.

Una vez caracterizado el mineral e identificada la biomasa, se procedió a la generación de biomasa, y a provocar la muerte de la misma mediante esterilización en autoclave.

3.2 Etapa II. Generación de biomasa muerta.

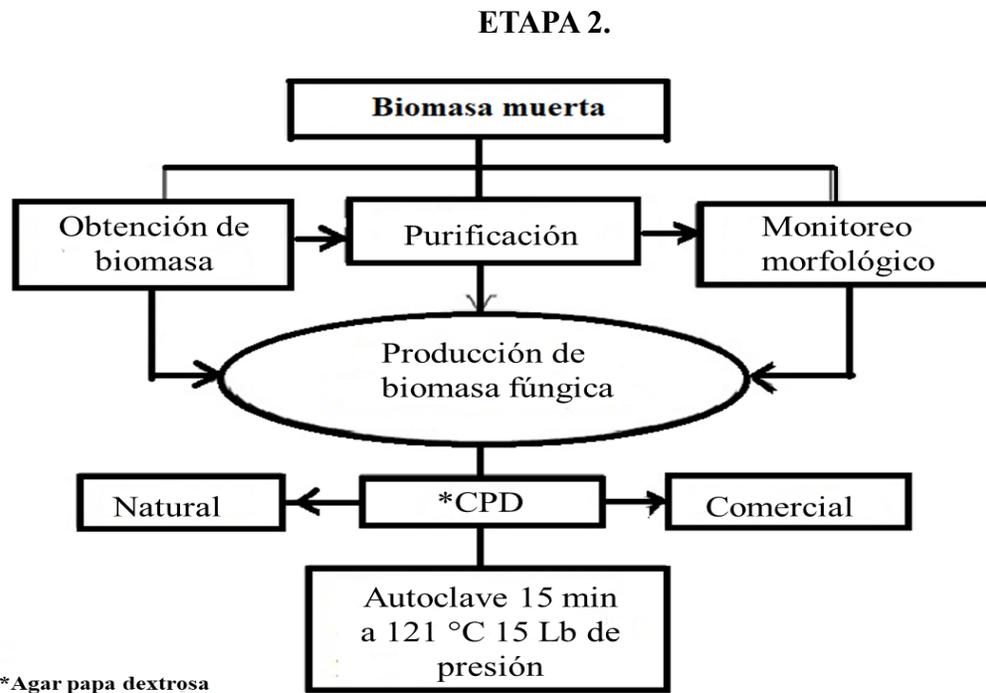


Figura 3.2. Diagrama de bloques de la fase experimental, etapa 2, obtención de biomasa.

3.2.1 Obtención de biomasa.

La cepa *Aspergillus niger* fue obtenida a través de una donación hecha por el Dr. Raúl Cortés Martínez perteneciente a la facultad de Químico-Farmacobiología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

3.2.2 Purificación de la cepa.

Se llevó a cabo la resiembra de la cepa de *Aspergillus niger*, con la finalidad de aislar y purificar al microorganismo, para descartar contaminantes ambientales o mutación de la cepa (Figura 3.2).

3.2.3 Monitoreo morfológico.

La identificación de los hongos filamentosos se basa en [46]:

- 1) La morfología macroscópica de las colonias. Las colonias miden entre 10-30 mm; son vellosas, algodonosas o pulverulentas, de vistosos colores, crecen radialmente de modo progresivo y se deben observar en el anverso y reverso para identificar si el pigmento difunde al medio (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Morfología macroscópica descriptiva de un hongo filamentosos [45].

Características macroscópicas	Hongo filamentosos
Color	Colonia anverso reverso pigmento
Superficie	Elevación plana, relieves (pliegues) y diámetro
Micelio	Presencia o ausencia
Aspecto	Vellosas o aterciopeladas, seca, húmedas algodonosas o pulverulentas

- 2) Morfología microscópica (Figura 3.2) que permite saber si se trata de hongos filamentosos. Se llevó a cabo a partir de la técnica del celo; se tomó un pequeño fragmento del medio de cultivo con el asa micológica o (también se puede tomar parte del micelio aéreo tocando con la cara adhesiva de un fragmento de cinta adhesiva celo transparente) y se transfirió a un portaobjetos en el que se depositó una gota de azul de lactofenol

previamente para su coloración (Figura 3.3). Esta técnica permitió la disposición óptima de las estructuras de reproducción asexual y una mejor observación de la morfología.



Figura 3.3. Técnica del celo. Observación microscópica del micelio aéreo [46].

3.2.4 Producción de biomasa fúngica.

Se llevó a cabo en un medio nutritivo caldo Sabouraud y papa dextrosa, además de caldo de papa natural con dextrosa, esto para verificar que medio era más favorable para el crecimiento fúngico; siendo el caldo de papa natural el más favorable para la producción de biomasa. Se incubó en medio aerobio a 30 °C por 72 horas a 150 rpm. Posteriormente, se sometió a una esterilización en autoclave (20 minutos a 121 °C) a una presión de 15 libras para obtención de biomasa muerta.

Teniendo la cepa fúngica y la capacidad para reproducirla, se procedió a la preparación de soluciones sintéticas para realizar los experimentos de biosorción (Figura 3.2).

3.3 Etapa III. Experimentos con soluciones sintéticas.

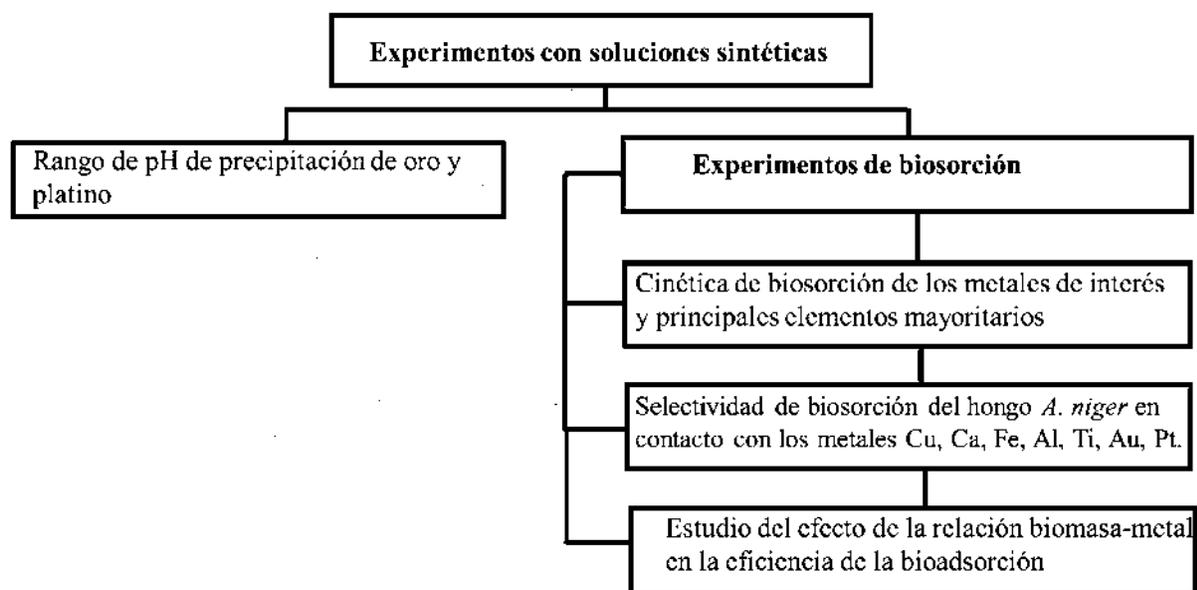


Figura 3.4. Diagrama de bloques de la fase experimental, Etapa 3, experimentos con soluciones sintéticas.

3.3.1 Efecto de pH sobre la precipitación de oro y platino

Se determinó el rango de pH en el que las especies iónicas de Pt y Au no precipitan en solución. Éste experimento se llevó a cabo a partir de una solución de 20 ppm de oro y platino, se procedió colocando 20 mililitros (mL) de la solución en tubos Falcón, a diferentes valores de pH (2, 3, 4, 5 y 6), una vez ajustado este parámetro se monitoreó pH, conductividad y Potencial Óxido-Reducción (ORP), en diferentes tiempos con el objetivo de detectar precipitados de los metales de interés y conocer el pH óptimo de adsorción, y finalmente las alícuotas se analizaron por espectrometría de absorción atómica (EAA – PinAacle 900H Perkin Elmer) (Figura 3.4) para establecer la concentración del metal en la solución residual.

3.3.2 Experimentos de biosorción

3.3.2.1 Cinética de biosorción

Se realizaron experimentos de contacto tipo lote para cada uno de los elementos metálicos Au, Pt, Fe, Al, Ti, Cu y Ca (son los principales elementos contenidos en un mineral) para establecer la biosorción del elemento. Estos experimentos se llevaron a cabo a partir de soluciones sintéticas. Se utilizaron 25 mL de cada una de las soluciones sintéticas y se pusieron en contacto con 1 gramo de la biomasa en tubos Falcón, a diferentes valores de pH (2, 3, 4, 5 y 6) y se monitorearon los parámetros de pH, conductividad y Potencial Óxido-Reducción (ORP). Se recolectaron muestras o alícuotas de la solución residual cada determinado tiempo hasta completar el experimento al transcurrir 120 minutos. Después de este tiempo la solución residual se analizó en un espectrómetro de absorción atómica (EAA – PinAacle 900H Perkin Elmer) (Figura 3.4).

3.3.2.2 Estudio de la selectividad de biosorción del hongo *Aspergillus niger* en contacto con los metales Cu, Ca, Fe, Al, Ti Au y Pt.

Se realizaron experimentos de contacto tipo lote, para 20 mg/L de oro y platino, por separado, en sistemas binarios con concentraciones conocidas (mayores a 50 mg/L) de los elementos metálicos mayoritarios reportados en el análisis de fluorescencia del mineral de cabeza, para establecer la selectividad en la biosorción de los metales de interés y los elementos mayoritarios presentes en el mineral. Estos experimentos se llevaron a cabo a partir de soluciones sintéticas. Se utilizaron 25 mL de cada una de las soluciones binarias sintéticas y se pusieron en contacto con 1 gramo de la biomasa muerta de *Aspergillus niger* en tubos Falcón durante 120 minutos, a pH 4, y se monitorearon los parámetros de pH, conductividad y Potencial Óxido-Reducción (ORP). Se recolectaron alícuotas cada 20 minutos durante la primera hora y en la segunda hora se recolectó la alícuota a los 40 minutos. La solución residual se analizó en un espectrómetro de absorción atómica (EAA – PinAacle 900H Perkin Elmer) (Figura 3.4).

3.3.2.3 Estudio del efecto de la relación biomasa-metal en la eficiencia de la biosorción

Se realizaron experimentos de contacto tipo lote, para 20 mg/L de oro y platino, por separado, en sistemas binarios con concentraciones conocidas (mayores a 50 mg/L) de los elementos metálicos

mayoritarios reportados en el análisis de fluorescencia del mineral de cabeza, con los elementos mayoritarios presentes en el mineral con diferentes cantidades de biomasa, con la finalidad de determinar la concentración de biomasa adecuada, que permita la bioadsorción del metal de interés. Estos experimentos se llevaron a cabo a partir de soluciones sintéticas. Se utilizaron 25 mL de cada una de las soluciones binarias sintéticas y se pusieron en contacto con 0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75, 1, 2 y 3 gramos de la biomasa muerta de *Aspergillus niger* en tubos Falcón por separado durante 120 minutos, a pH 4. Se monitorearon los parámetros de pH, conductividad y Potencial Óxido-Reducción (ORP). Se recolectaron alícuotas cada 20 minutos durante la primera hora y en la segunda hora se recolectó la alícuota a los 40 minutos. La solución residual se analizó en un espectrómetro de absorción atómica (EAA – PinAacle 900H Perkin Elmer) (Figura 3.4).

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización del mineral

4.1.1. Distribución de tamaño de partícula y D80

El diámetro equivalente D80 significa el 80% de las partículas menores a cierto diámetro, o diámetro equivalente de partículas que pasan por un determinado tamiz. En la Figura 4.1, se muestra la distribución de tamaño de partícula del mineral de estudio, donde se aprecia que el mineral de cabeza tiene 59% de partículas con diámetro menor a 0.074 milímetros (malla 200), correspondiente a 74 micrómetros (μm), para motivo de disolución o lixiviación de partículas, el mineral ya no requiere de una molienda adicional. La Figura 4.2 muestra el D_{80} calculado gráficamente de 0.1 mm.

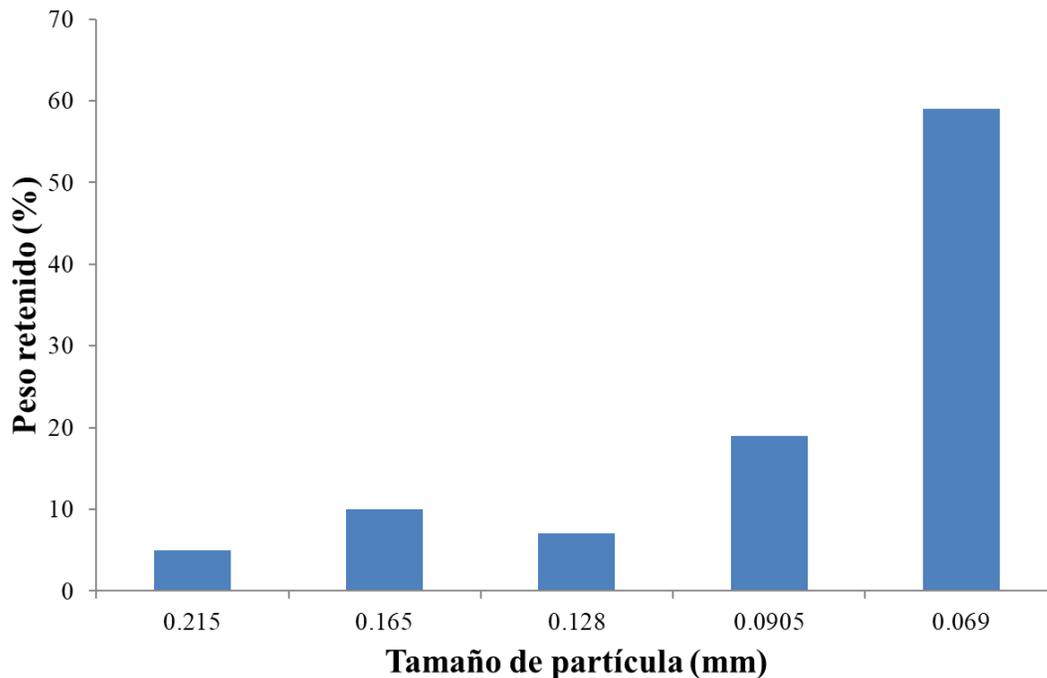


Figura 4.1. Distribución del tamaño de partícula del mineral.

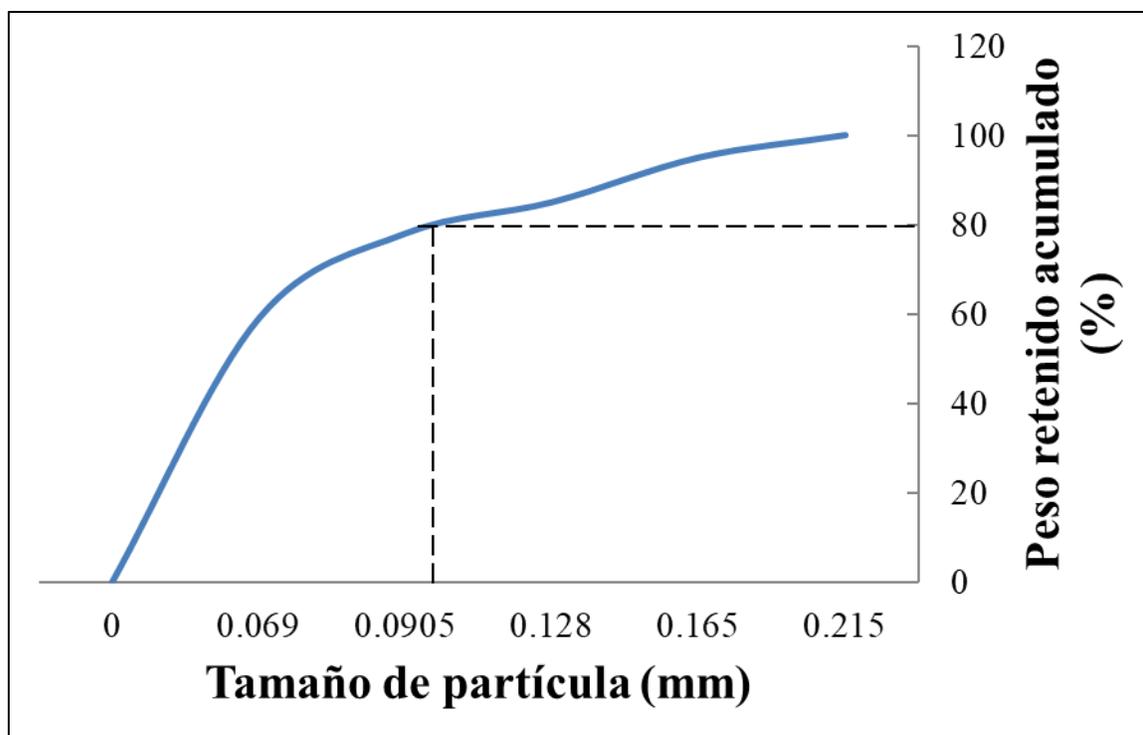


Figura 4.2. Determinación gráfica del D₈₀ del mineral de cabeza.

4.1.2. Análisis químico por Difracción de rayos X (DRX)

En la Figura 4.3 se muestra el diagrama de difracción de rayos X del mineral, los picos de difracción se asignaron según la base de datos de las fichas PDF para la identificación de las especies minerales. Para cuarzo el PDF 01-070-2517 SiO₂ Quartz low – theoretical, para albita el PDF 00-041-1480 (Na, Ca) Al (Si, Al)₃O₈, para sanidina el PDF 00 019-1227 AlKO₈Si₃ y para hematita el PDF 00-002-0919 Fe₂O₃. Se observó un pico de alta intensidad en 2θ de 26.5° correspondiente a cuarzo, y con menor intensidad se observaron picos a 20.8°, 40.2°, 54.8°, 59.8°. Los picos 39.4°, 42.3°, 63.9° y 67.6° se indexaron a cuarzo y albita conjuntamente, mientras que a 45.7° aparece un pico correspondiente a cuarzo, albita y sanidina. También se identificaron varios picos que presentan tanto albita como sanidina a 13.8°, 22.8°, 25.7°, 27.7°, 29.8° y 35.5°, además de un pequeño pico a 40.2° de cuarzo y sanidina. Se presentaron dos picos a 21.9° y 24.05° indexados a hematita y albita conjuntamente y a 31.4° aparece un pequeño pico asociado únicamente a albita.

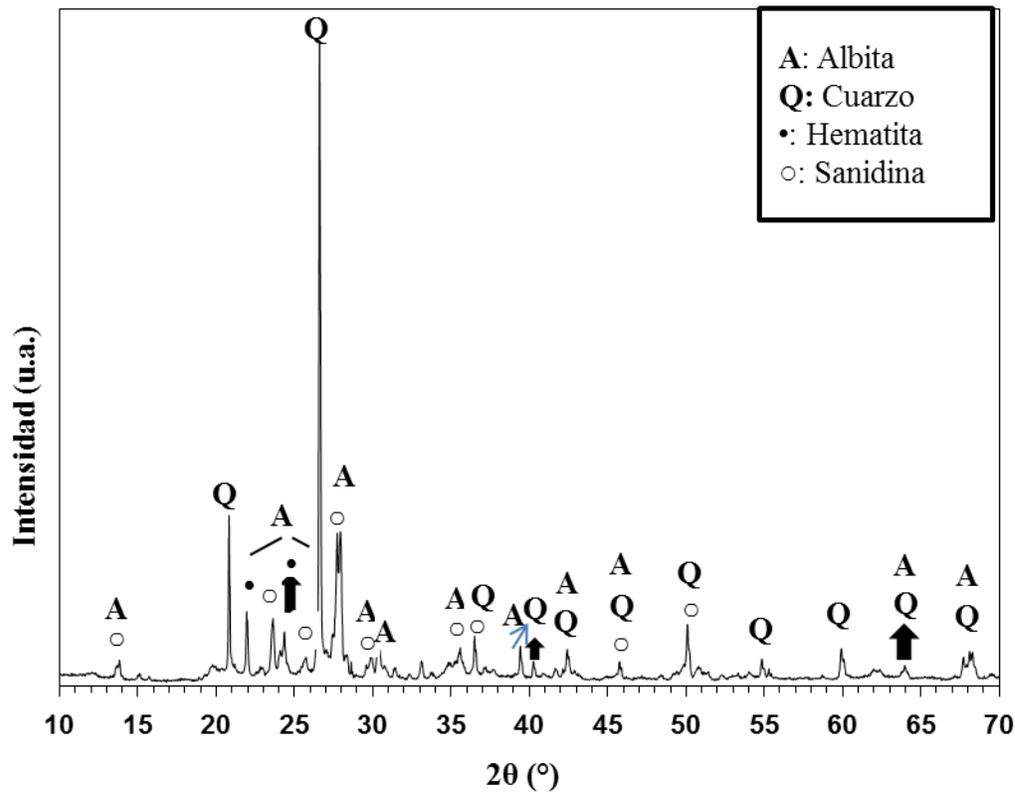


Figura 4.3. Difractograma con las especies minerales correspondientes al mineral de cabeza.

4.1.3. Análisis químico por Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Se aplicó también la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) para el análisis químico elemental del mineral. Los resultados se muestran en la Tabla 4.1 donde se puede apreciar los componentes con mayor porcentaje son Si, Al y Fe, seguidos de K, Ca y Na, que corresponden a las especies minerales cuarzo, albita, sanidina y hematita, respectivamente; además de presentar compuestos en ppm.

Tabla 4.1. Análisis químico por FRX del mineral de platino, expresado en porcentaje elemental.

Elemento	Porcentaje
Hierro (Fe)	17.8 %
Aluminio (Al)	11.8 %
Calcio (Ca)	4.89 %
Titanio (Ti)	1.52 %
Silicio (Si)	52.4 %

4.1.4. Análisis químico por Espectroscopía de absorción atómica (EAA)

El análisis químico cuantitativo realizado al mineral de cabeza arrojó los resultados reportados en la Tabla 4.2, por la técnica de espectroscopia de absorción atómica, obteniendo un total de 166.90 g/Tn para Pt, y de 6.78 g/Tn para Au. Previo a este análisis, se realizaron con agua regia dos tipos de digestiones, parcial y completa (Figura 4.4 y 4.5), el resultado obtenido indicó la distribución de oro y platino en el mineral, notándose que gran parte de estos metales se encuentran encapsulados en la especie de silicio.

Tabla 4.2. Análisis químico cuantitativo realizado al mineral de cabeza por EAA.

Muestra	Pt g/Tn	Au g/Tn
M-1	157.77	1.84
M-2	161.16	3.68
M-3	171.44	3.86
Total	166.90	6.78

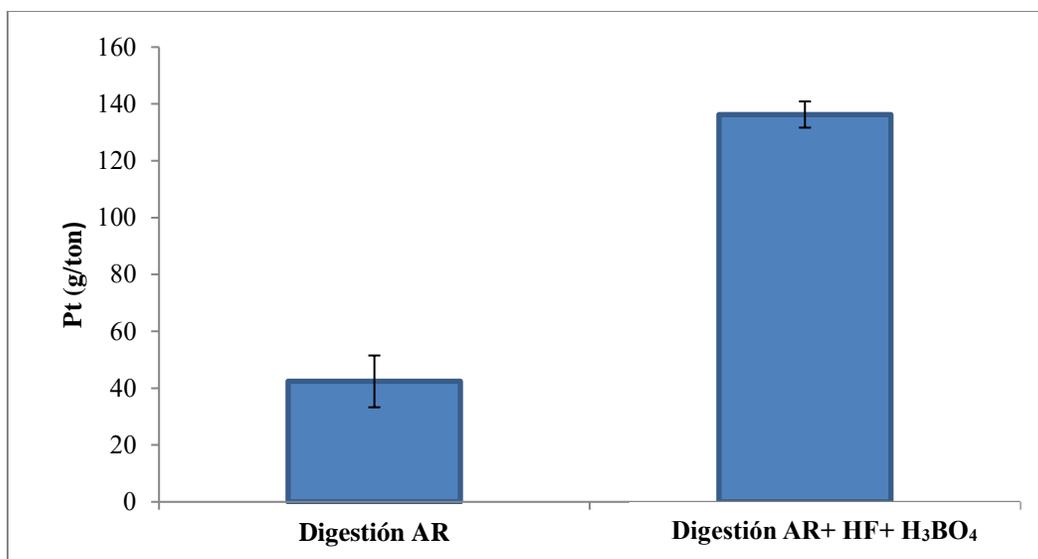


Figura 4.4. Determinación del Pt por absorción atómica a través de digestión con agua regia y digestión con AR + HF + H₃BO₄.

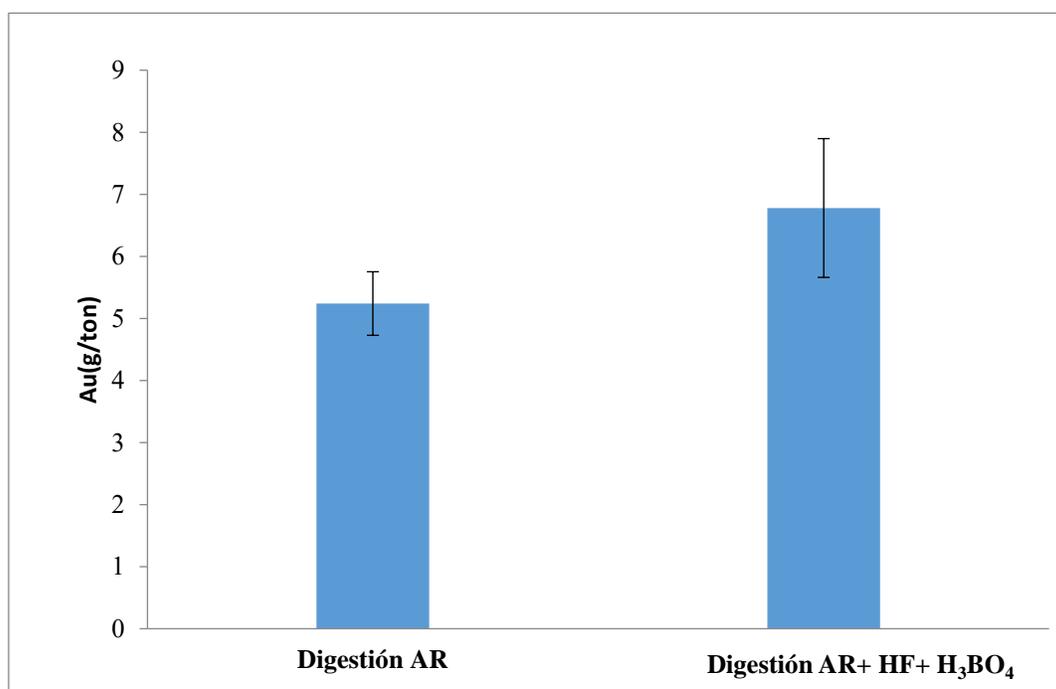


Figura 4.5. Determinación del Au por absorción atómica a través de digestión con agua regia y digestión con AR + HF + H₃BO₄.

4.1.5. Estimación de la densidad del mineral

Se determinó la densidad al mineral por triplicado, por el método del picnómetro, obteniendo un resultado cuya densidad promedio fue de 2.58 g/cm³. Los resultados experimentales de la densidad calculada para el mineral se muestran en la Tabla 4.3 en base a la ecuación 3.1.

Tabla 4.3. Estimación de la densidad del mineral de cabeza.

Muestra	W _{Mineral}	W ₂	W ₃	ρ, g/cm ³
1	2.002	50.5734	51.3448	2.59
2	2.001	50.5874	51.3456	2.59
3	2.009	50.5876	51.3536	2.57

Considerando que la densidad de la fase mayoritaria en el mineral (Sílice), es de 2.17 a 2.31, el valor restante incluye especies minerales o metales más pesados, como son el platino, oro y hierro, principalmente.

4.1.6. Microscopia electrónica de barrido MEB

Mediante microscopía electrónica de barrido se observó la morfología del mineral y se realizaron análisis químicos puntuales al mineral de cabeza. En la Figura 4.4 se observa una superficie con textura lisa, rugosa y con inclusiones, además de mostrar forma irregular. También se presenta en la Figura 4.5 un análisis elemental del campo de la micrografía que coincide con el análisis elemental presentado en los resultados de fluorescencia, anteriormente discutidos.

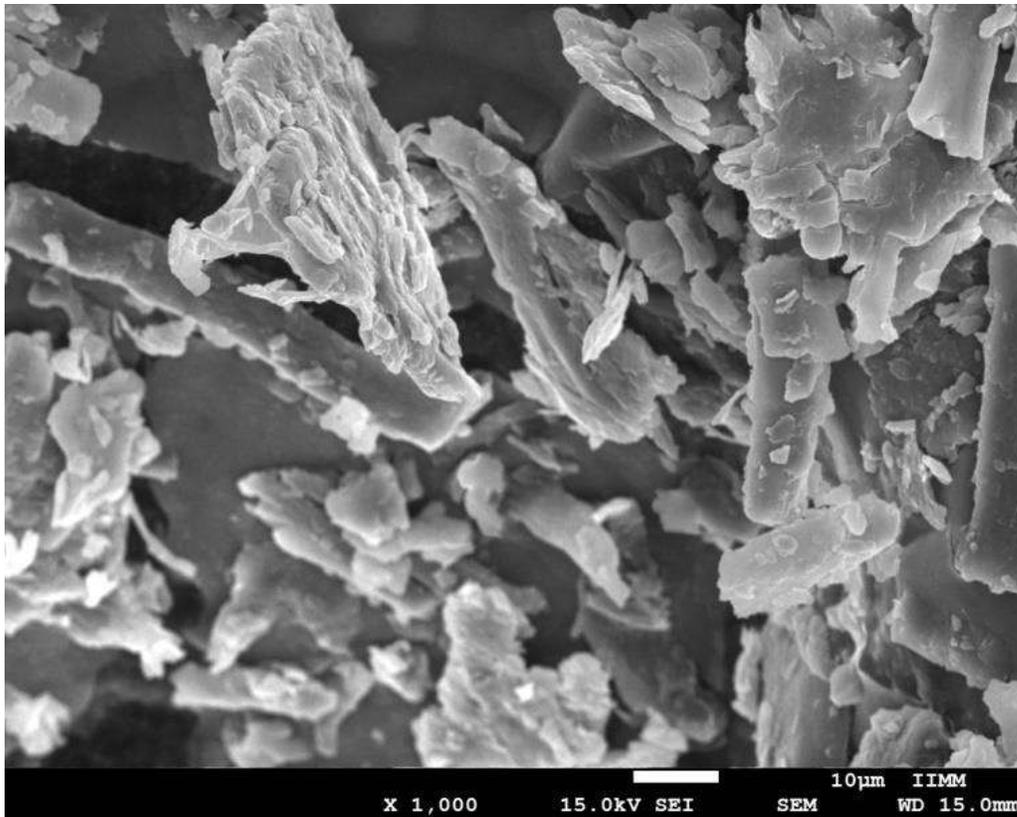


Figura 4.6. Micrografía de las partículas del mineral a1000X.

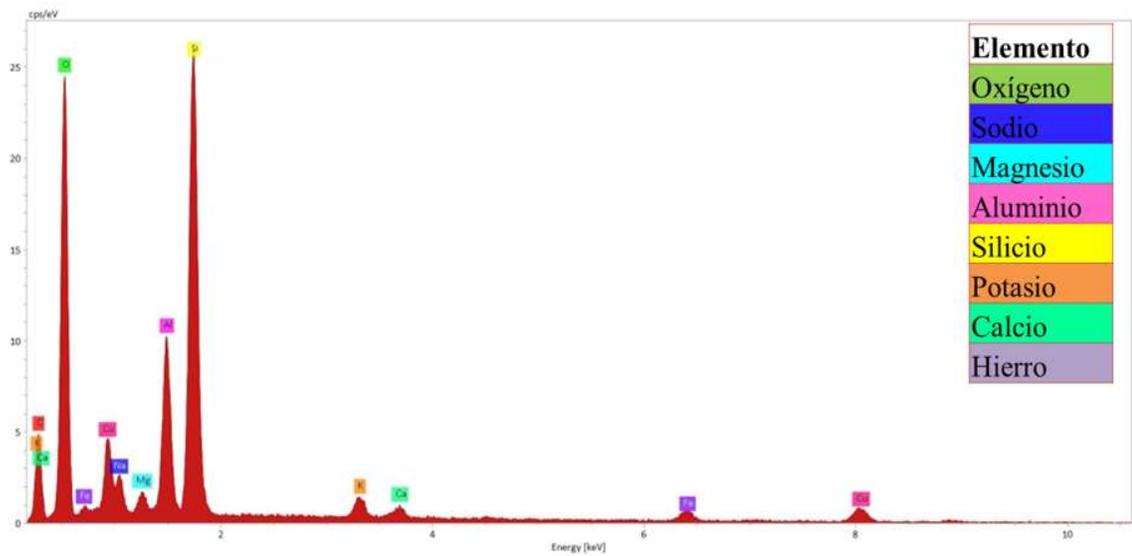


Figura 4.7. Microanálisis elemental del campo observado en la micrografía.

4.2. Caracterización de la biomasa antes del contacto

4.2.1. caracterización por microscopía óptica (MO)

Se llevó a cabo la identificación de las características macroscópicas del hongo en agar papa dextrosa (APD). Se identifica como un micelio bien desarrollado, hialino con abundantes ramificaciones, ligeramente algodonoso y septado, hifas multinucleadas y predominantes conidios de color negro, como se muestra en la Figura 4.8. También se identificaron las características microscópicas del hongo, haciendo uso del microscopio óptico; se identificaron las estructuras especializadas, como microconidios, conidióforo, fiálides y vesícula.

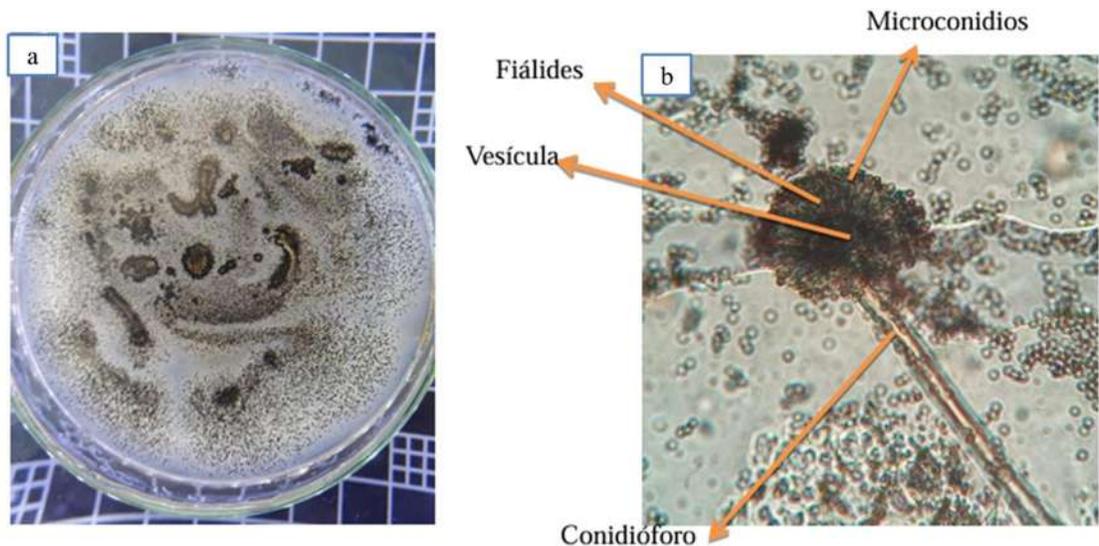


Figura 4.8. a) Cultivo de *Aspergillus niger*; b) *Aspergillus niger* (Azul de lactofenol, 40X).

4.2.2. Caracterización por espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR)

A continuación, se discute el resultado de la caracterización realizada por FTIR al hongo *Aspergillus niger*. En la Figura 4.9 se muestra el espectro de infrarrojo de la biomasa donde se registran bandas a 3419 cm^{-1} correspondiente a las vibraciones de estiramiento de los grupos O-H (hidroxilo) de los polisacáridos y a la tensión vibracional del grupo N-H (amino) correspondiente a las proteínas y el grupo acetamido de la quitina [46, 47]. La banda 2925 cm^{-1} y

la banda 2855 cm^{-1} se asocia con el modo asimétrico del CH_2 y con las vibraciones de tensión del C-H (grupos alifáticos) de los ácidos grasos [48]. A 2144 cm^{-1} se presenta una banda atribuida a la vibración de tensión del grupo $\text{C}\equiv\text{C}$, también se registraron bandas a 1744 cm^{-1} y 1645 cm^{-1} propias de la vibración de estiramiento del $\text{C}=\text{O}$ y de la tensión vibracional del enlace $\text{C}=\text{O}$ (correspondiente a las agrupaciones de amidas), respectivamente. Además, se presentan bandas a 1552 cm^{-1} debido a la deformación de amidas (N-H) [48], a 1451 cm^{-1} atribuida al estiramiento asimétrico del CH_3 (grupo alifático) y a 1375 cm^{-1} asociada al grupo COO^- (carboxilato) [48]. Las bandas 1150 cm^{-1} y 1035 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de estiramiento de la quitina y de las aminas propias de las fracciones de proteínas [47], mientras que las bandas a 850 cm^{-1} y la banda 697 cm^{-1} , se asocian con los anillos aromáticos ($=\text{CH}$) [49].

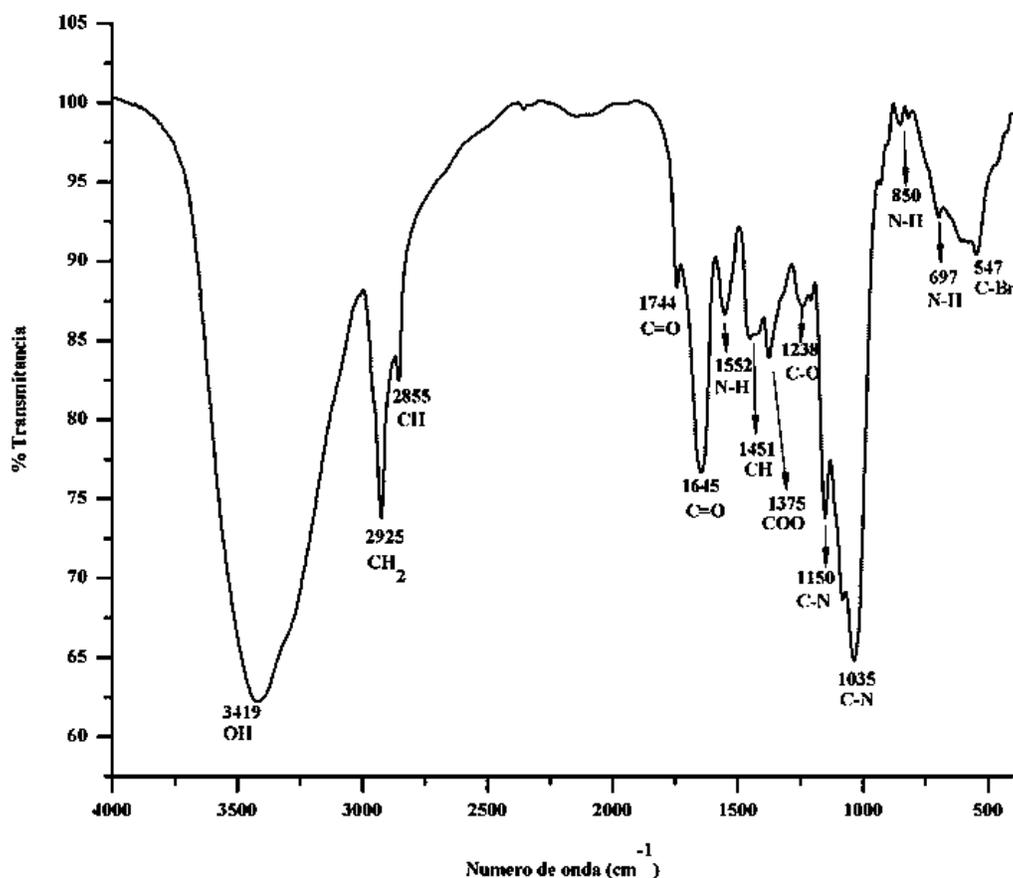


Figura 4.9. Espectro FT-IR de la biomasa muerta de *Aspergillus niger*.

Los grupos funcionales encontrados en la biomasa se presentan en la Tabla 4.4 [46, 47, 48].

Tabla 4.4. Grupos funcionales y número de onda identificados por FTIR la biomasa.

Número de onda	Enlace	Carga	Grupo funcional	Tipo de vibración
3419.51	O-H, N-H	(-), (+)	Hidróxilo	Estiramiento
2925.14	CH ₂	No ionicos	Metileno	Asimétrico
2855.11	C-H	No ionicos	Alcanos	Tensión
1744.06	C=O	(-)	Ácido carboxílico	Estiramiento
1645.5	C=O	(-)	Carboxilo (correspondiente a las agrupaciones de amidas)	Tensión
1552.21	N-H	(+)	Amida	Deformación
1451.7	CH ₃	No ionicos	Metilo	Asimétrico
1375.67	COO ⁻	(-)	Carboxilato	
1238.4	C-O, C-N	(-)	Ácido carboxílico, Amina alifática	Tensión
1150.97	C-N (alquil)	(-)	Amina	Tensión
1035.49	C-N (alquil)	(-)	Amina	Tensión
850.76	C-H (para)	No ionicos	Anillo Aromático	Deformación
697.71	C-H (mono)	No ionicos	Anillo Aromático	Deformación
547.08	C-Br		Haluros de alquilo	Tensión

4.3. Efecto del pH en la precipitación de metales con soluciones sintéticas unitarias

Los análisis químicos cuantitativos por espectroscopía de absorción atómica (EAA), realizados a las soluciones residuales de los experimentos donde solo se varió el pH, para establecer la posible precipitación del metal en soluciones sintéticas unitarias, se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Resultados del análisis cuantitativo de Au y Pt en las soluciones residuales, a diferentes valores de pH.

pH	Solución inicial de Au y Pt, ppm	Solución residual de Au, ppm	Solución residual de Pt, ppm
2	20.0	19.7	19.8
3	20.0	19.7	19.9
4	20.0	19.9	19.9
5	20.0	19.8	19.8
6	20.0	19.8	19.9

Los resultados no muestran disminución en la concentración del metal en las soluciones residuales unitarias. De acuerdo a los diagramas de Pourbaix (Figura 4.10), el oro y el platino no presentan precipitados dentro de los valores de pH establecidos en este trabajo, por lo que la disminución de

la concentración se debe a errores normales en los equipos de espectroscopía o más probablemente atribuidos al ruido electrónico; además, se monitorearon el pH, la conductividad y el ORP durante 120 minutos, y no se observaron cambios.

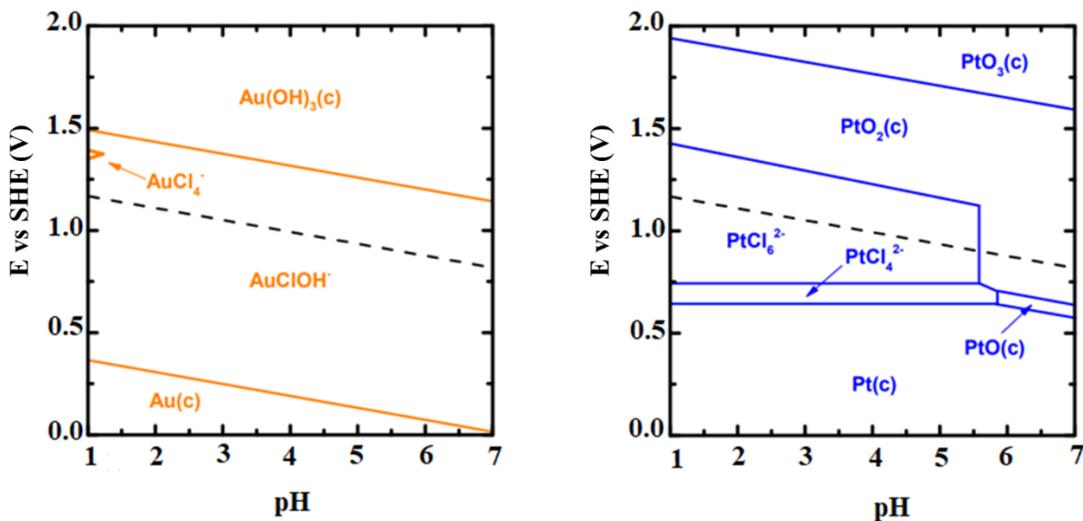


Figura 4.10. Diagramas de especiación de los sistemas Au-H₂O-Cl y Pt-H₂O-Cl a 25°C [50].

Una vez establecido que en el rango de pH de 2 a 6 no sucede la precipitación de especies metálicas en las soluciones sintéticas preparadas, es posible continuar con los experimentos de biosorción con la certeza de que la disminución del metal en solución después del contacto biomasa-solución no es atribuida a la precipitación de especies metálicas en solución.

4.4. Biosorción de iones metálicos por el contacto biomasa muerta-solución sintética

4.4.1. Soluciones sintéticas unitarias

En la Figura 4.11, se muestra el comportamiento de la cinética de biosorción a pH 2 de los elementos Au, Pt, Al, Ca, Cu, Fe y Ti. Todos muestran un comportamiento similar en el rango de valores de pH de 2 a 6 (ver anexo B) obteniendo un porcentaje de biosorción de 97, 77.4, 68.6, 56.1, 38.08, 29.3 y 19.03 para Au, Pt, Fe, Al, Ti, Cu y Ca respectivamente.

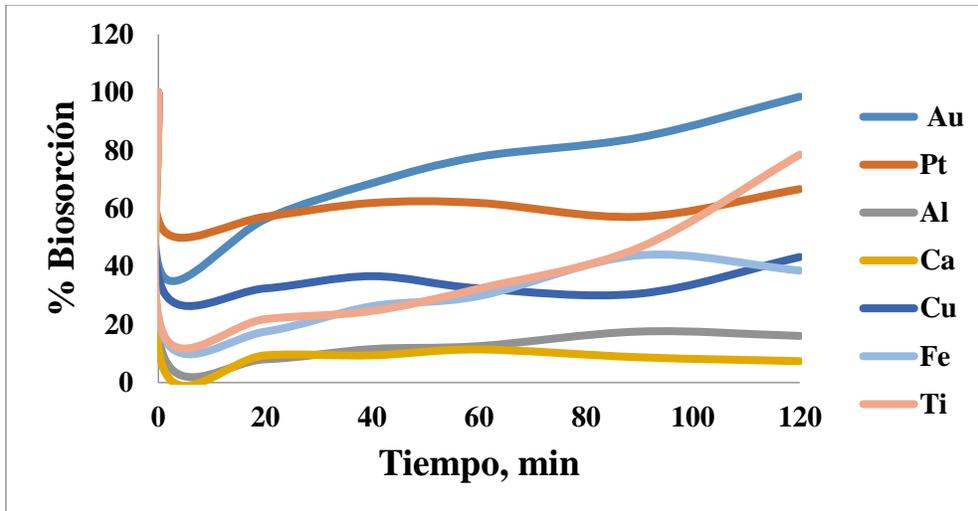


Figura 4.11. Comportamiento de la cinética de biosorción a pH 2 de los elementos Au, Pt, Fe Al, Ti, Cu y Ca.

4.4.1.1. Sistema biomasa - oro

La Figura 4.12 muestra el comportamiento de biosorción a pH 2, 4 y 6. En todos los rangos de pH se distingue una velocidad de biosorción considerable en los primeros minutos, debido a la gran disponibilidad de sitios activos para la adsorción; a medida que avanza el experimento estos sitios en la biomasa se van ocupando, hasta alcanzar un 98,5 % de biosorción de oro después de 120 minutos de experimentación. A pH 4 el comportamiento es similar a la recuperación de oro por biosorción del 98.4%, mientras que para pH 6 este porcentaje es del 94.9%. En 1997, Gomes y col. a partir de un lixiviado que contenía metales y cianuro aislaron *Aspergillus niger*, obteniendo 62 % de recuperación de oro, mientras que en este trabajo se recuperó prácticamente el 100% con la biomasa muerta del mismo microorganismo.

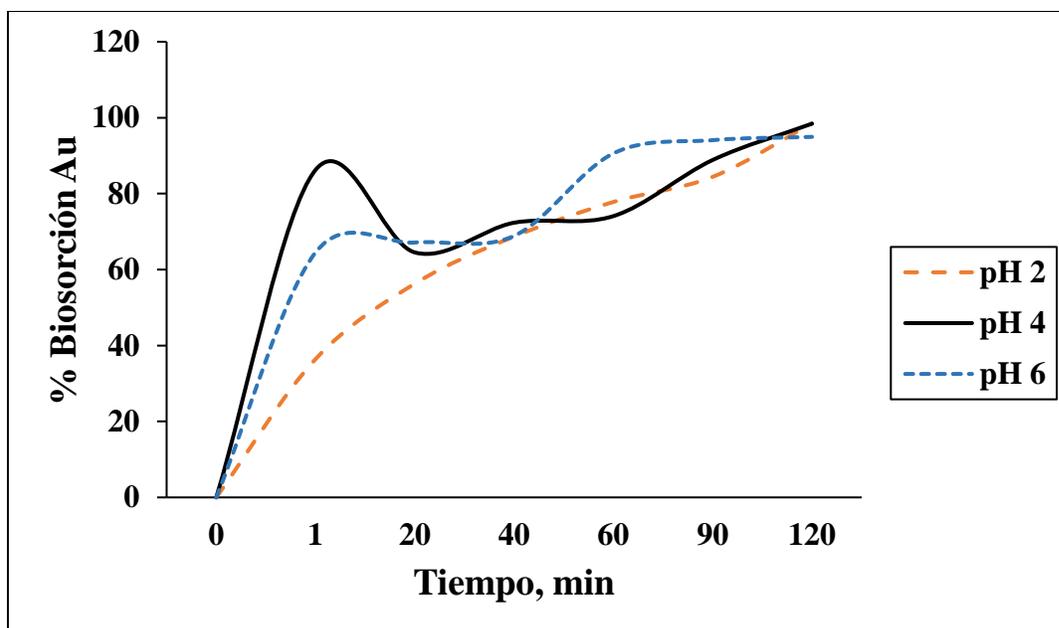


Figura 4.12. Comportamiento de la cinética de biosorción de oro a pH 2, 4 y 6.

4.4.1.2. Sistema biomasa - platino

La Figura 4.13 muestra el comportamiento de la cinética de biosorción a pH 2, 4 y 6 para platino. Para pH 2, en los primeros cinco minutos, hay un gran aumento en la tasa de biosorción del ion metálico, lo que se atribuye a la gran disponibilidad de sitios activos en la biomasa para atraer y atrapar iones de platino; de 10 a 120 minutos la velocidad de biosorción es menor porque también disminuyen los sitios activos disponibles; a 120 se alcanza el porcentaje máximo de biosorción que en este caso es del 66,6%. Para pH 4 y 6 se observan comportamientos similares que para pH 2, aunque el porcentaje de recuperación de platino es del 100% para pH 4 y del 51% para pH 6. En 1997, Gomes y col. aislaron una cepa viva de *Aspergillus niger* y la pusieron en contacto con un lixiviado que contenía metales, y únicamente recuperaron un 62% de oro.

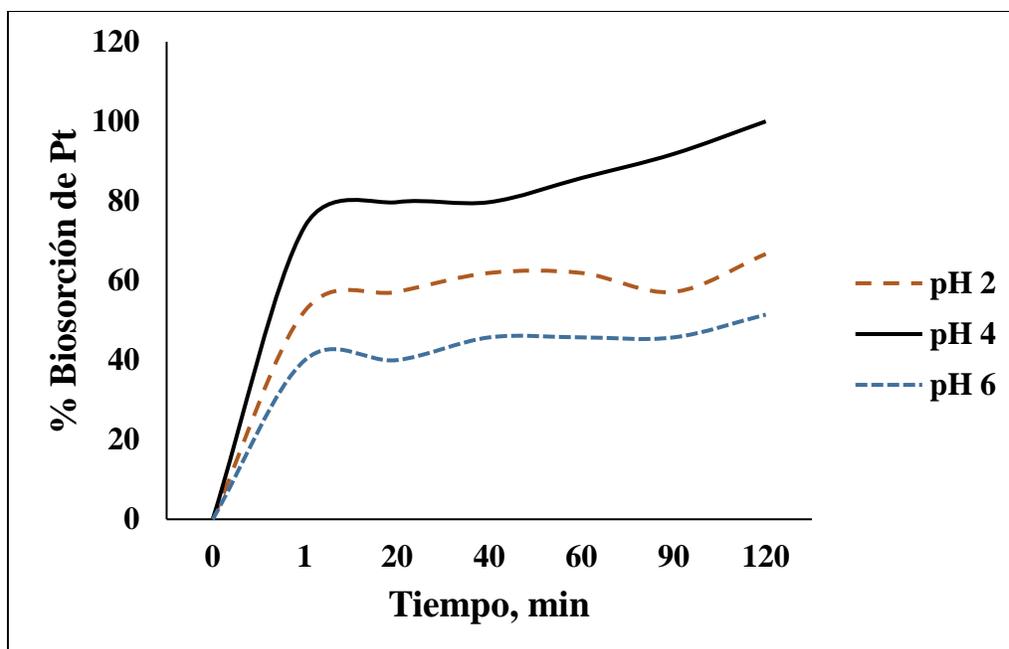


Figura 4.13. Comportamiento de la cinética de biosorción de platino a pH 2, 4 y 6.

De lo anterior, y para pH 2 y 6, el factor limitante en la biosorción son los sitios activos en la biomasa, y se concluye que el pH 4 modifica la superficie del hongo de tal manera que un mayor número de sitios quedan disponibles para atraer iones de platino y las especies iónicas formadas. De acuerdo al diagrama de pourbaix, sólo coexisten en ese rango de pH la especie clorada y el platino metálico (ver Figura 4.13).

4.4.1.3. Variaciones del pH, Conductividad eléctrica y ORP

Durante los experimentos de contacto biomasa-solución metálica, se registraron los valores del pH, conductividad eléctrica y potencial óxido reducción, con la finalidad de establecer algún posible cambio en la cinética de biosorción, además de identificar la o las especies en equilibrio de acuerdo a los correspondientes diagramas de Pourbaix [9, 16], bajo las correspondientes condiciones experimentales. En la Tabla 4.4 se muestran estas variaciones durante la experimentación para los sistemas unitarios Pt y Au. Como se aprecia, el pH varía levemente y permanece en el rango que descarta la formación de fases sólidas o en solución que modifiquen la cinética de bioadsorción.

Tabla 4.6. Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP), en las soluciones unitarias durante los experimentos de bioadsorción. Sistemas unitarios Pt y Au.

	Au	Pt	Au	Pt	Au	Pt
Tiempo	pH	pH	Conductividad S/m	Conductividad S/m	ORP Rm/v	ORP Rm/v
1	4.12	4.1	2.6	2.6	741.7	552.3
20	3.93	4.03	2.4	2.6	717	550.3
40	3.96	4.21	2.4	2.5	734	553.1
60	3.97	4.14	2.4	2.4	796	567.5
90	3.97	4.07	2.4	2.4	726.6	547.3
120	4.01	4.07	2.3	2.3	711.8	541.2

Se observa que, a los 20 minutos, el pH disminuye a 3.93, permanece constante a los 40, 60 y 90 minutos en 3.97, mientras que a los 120 minutos incrementa a 4.01 en el caso de oro; mientras que, para el sistema unitario de platino, disminuye a los 20 minutos, aumenta y disminuye a los 40 y 60 minutos respectivamente para finalmente permanecer constante a los 90 y 120 minutos. Lo anterior, es debido a que en la pared celular se lleva a cabo la protonación o la desprotonación de los grupos funcionales, proceso requerido para que se lleve a cabo la biosorción, por lo que al incrementar el pH hay una intensificación de las fuerzas electrostáticas involucradas en el proceso de adsorción de los sitios activos, y consecuentemente los sitios activos sobre la pared celular se desprotonan y aumenta la carga negativa con un incremento del enlace de los metales a los grupos funcionales de la biomasa microbiana; por otra parte, a pH ácidos los sitios de adsorción disponibles son saturados por los protones ya que hay más de éstos en la solución puesto que los metales existen como iones libres [16, 17].

En cuanto a la variación de la conductividad eléctrica en el medio acuoso, se observa que ésta prácticamente no cambia y las variaciones son normales por el “ruido” electrónico del potenciómetro. La poca variación de los valores de conductividad son producto de la baja concentración en partes por millón de iones metálicos al inicio y durante el contacto hongo-solución.

También se registraron los cambios en el potencial de óxido reducción (ORP), comparando estos valores de ORP con los correspondientes diagramas de Pourbaix de los sistemas Pt-H₂O-HCl y Au-H₂O-HCl [53], presentados en la Figura 4.10. Se comprueba que, de acuerdo al pH de la experimentación, las especies acuosas presentes son cloruros y no existe algún tipo de precipitados o compuestos entre el platino y el oro, solamente compuestos clorados de oro o de platino

4.4.2. Soluciones sintéticas binarias

4.4.2.1. Sistema biomasa oro - platino

Los resultados del sistema binario Au- Pt se muestran en la Figura 4.14, se observa que ambos metales compiten por los sitios de unión de la biomasa fúngica. Esto se debe a que oro y platino se encuentran juntos en el mismo período de la tabla periódica y su electronegatividad es parecida (Au= 2.4; Pt= 2.2); sin embargo, el radio iónico es mayor para oro (138 pm) y menor para platino (52 pm) por lo que la biomasa muerta de *Aspergillus niger*, es aún más selectiva para platino que para oro; es decir, más iones de platino se acomodan en la superficie de la biomasa.

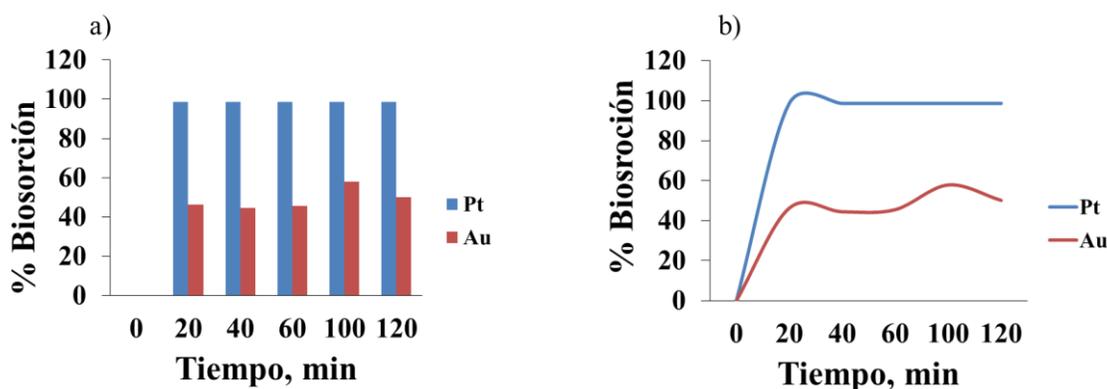


Figura 4.14. Porcentaje de remoción del sistema binario Pt- Au mostrados en el inciso a) y b).

Los resultados de la cinética de biosorción de platino y oro a pH 4 se presentan en la misma Figura 4.14. Se distingue para platino un incremento en la velocidad de biosorción, debido a la gran disponibilidad de sitios activos, alcanzando el mayor porcentaje de remoción a los 20 minutos y manteniéndolo hasta los 120 minutos. En el caso del oro, en los primeros veinte minutos se distingue un aumento en la velocidad de remoción del ion metálico, lo cual se atribuye a la

disponibilidad de sitios activos; continuando, a partir de los cuarenta minutos hay una disminución en la velocidad del proceso de biosorción, ya que los sitios disponibles principales se van ocupando; a partir de los sesenta minutos hay un incremento en la biosorción del metal, alcanzando la máxima biosorción a los 100 minutos, y el máximo porcentaje de remoción.

4.4.2.2. Monitoreo de pH, Conductividad eléctrica y ORP en el proceso de biosorción del sistema Pt-Au

La Figura 4.15 muestra las variaciones del pH durante los experimentos de bioadsorción. Esta variación es insignificante y permanece prácticamente constante durante los 120 minutos de contacto.

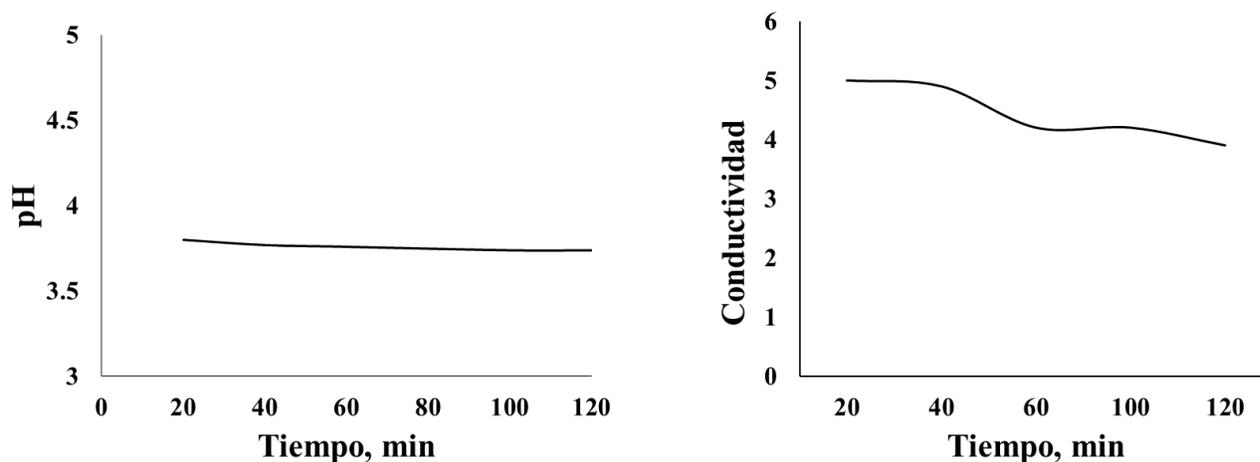


Figura 4.15. Representación gráfica de la variación del pH y la conductividad eléctrica en el sistema Pt-Au.

En el caso de la conductividad eléctrica, se observa que ésta disminuye a medida que pasa el tiempo de contacto, debido a la disminución de iones en solución a medida que avanza la bioadsorción.

La Figura 4.16 muestra las variaciones de ORP para el sistema platino-oro. De acuerdo a los diagramas de Pourbaix para los sistemas Au-H₂O-Cl y Pt-H₂O-Cl, los valores de ORP obtenidos indican que los experimentos se están realizando en la zona de estabilidad de las especies iónicas AuCl₄⁻ y PtCl₄⁻, concluyendo que no existe formación de precipitados y que las especies iónicas de oro y platino serán luego adsorbidas en los sitios activos apropiados en la superficie de la biomasa.

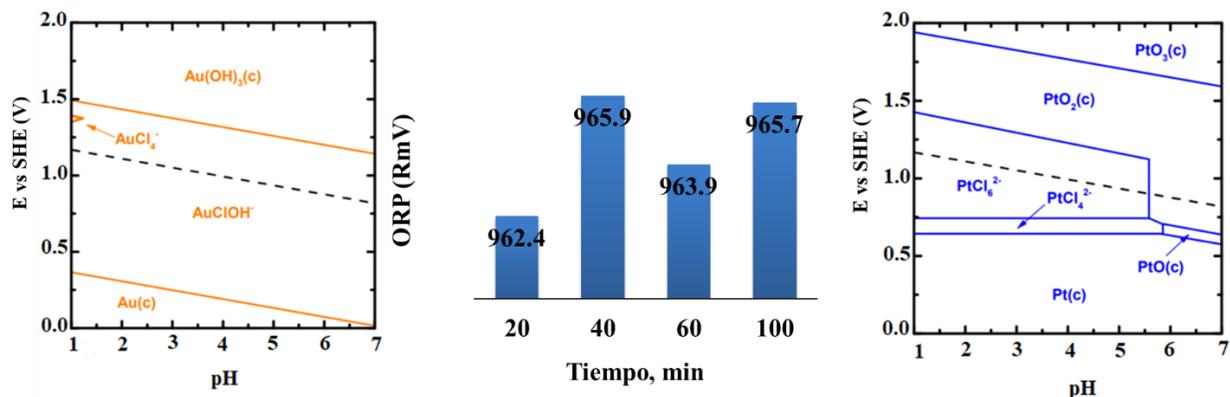


Figura 4.16. Representación gráfica de la cinética para el monitoreo del Potencial de óxido-reducción (ORP) a pH 4 para el sistema binario Pt-Au y diagrama de Pourbaix de los sistemas Au-H₂O-Cl y Pt-H₂O-Cl.

4.4.2.3. Sistemas biomasa platino- resto de los metales

Los resultados obtenidos para los diferentes sistemas binarios con platino, se muestran en las Figuras 4.17 y 4.18. En todos los casos, el porcentaje de remoción para platino fue mayor que el resto de los metales analizados (Ca, Cu, Fe, Ti y Al), a pesar de que la concentración de platino (20 ppm) fue menor en comparación con las concentraciones del resto de los metales (mayores a 50 ppm).

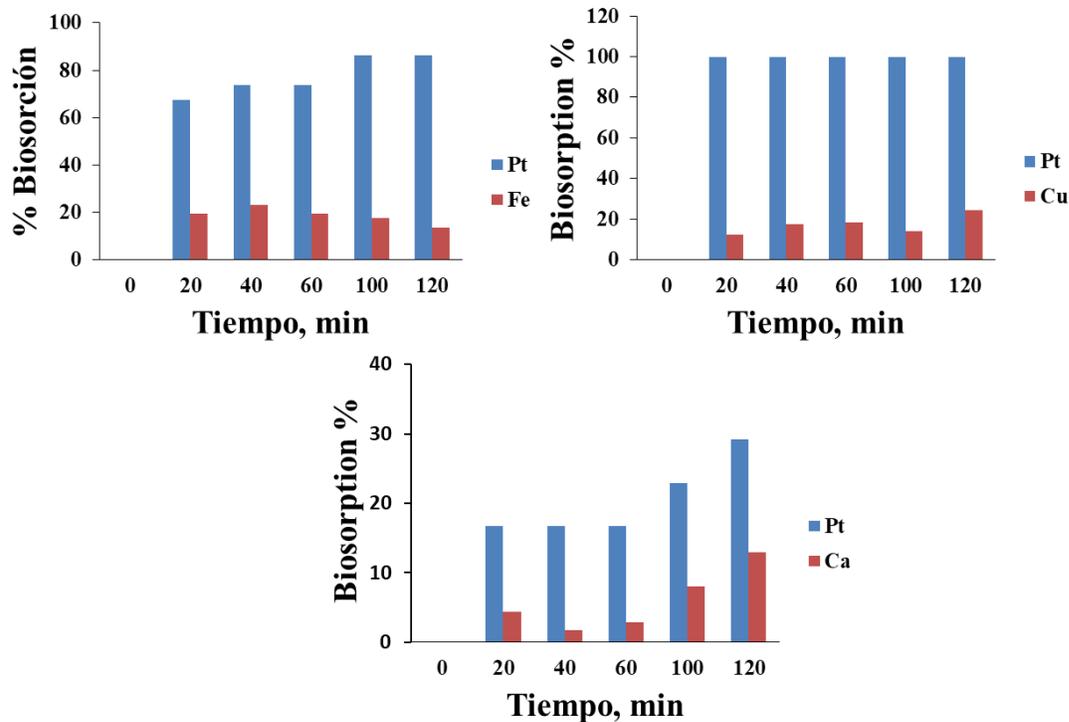


Figura 4.17. Porcentaje de biosorción de los sistemas binarios de platino: Pt- Fe, Pt-Ca, y Pt-Cu.

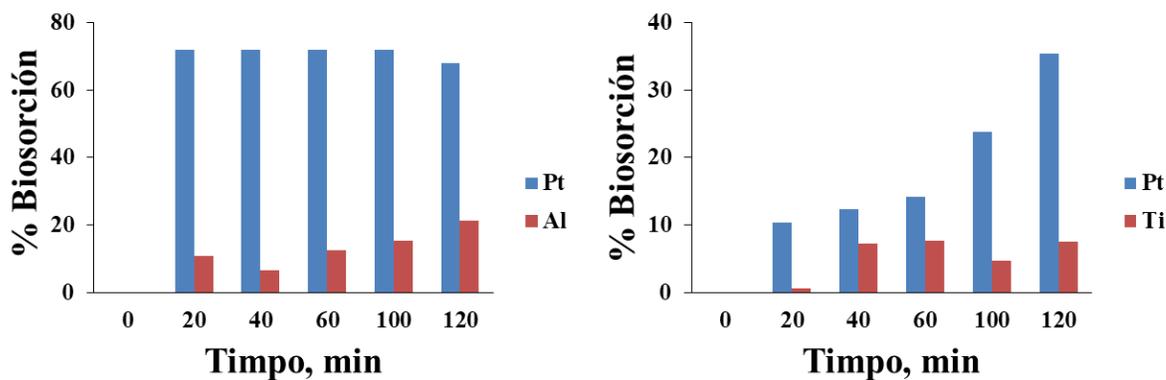


Figura 4.18. Porcentaje de remoción de los sistemas binarios de platino: Pt-Al y Pt- Ti.

El comportamiento anterior, se debe a que los iones de platino presentan menor radio iónico (52 pm) y una energía de ionización mayor (870 KJ/mol) [54]. De modo que la biomasa muerta de *Aspergillus niger* mostró preferencia por los iones de platino. En el caso del sistema binario Pt-Ca, la biosorción para Pt fue del 100 %, debido a que el platino tiene un radio iónico menor (52 pm) que calcio (118 pm) y mayor electronegatividad (Pt=2.2 y Ca=1.0). Entre menor sea el radio iónico mayor cantidad del metal se acomodará en los sitios activos presentes en la biomasa, y a mayor

electronegatividad, más fácilmente se adhiere a los grupos funcionales presentes en la superficie de la biomasa.

Para los sistemas Pt-Fe, Pt-Al y Pt- Ti, los resultados muestran una competencia por los sitios de unión en la biomasa, este comportamiento se debe a sus propiedades, como el número de oxidación y electronegatividad. Para hierro, aluminio y titanio el número de oxidación que presentan es 3+, mientras que platino tiene un numero de oxidación 2+, sin embargo, tiene mayor electronegatividad que los elementos en cuestión, lo que lo hace más selectivo para la biomasa muerta de *Aspergillus niger*. Mientras que para el sistema Pt-Cu también se presenta competencia por los sitios activos de la biomasa, lo cual se atribuye a la electronegatividad tanto de cobre (1.9) como platino (2.2), ya que no hay gran diferencia entre ambas, sin embargo, se adsorbe preferentemente el platino debido al menor radio iónico que presenta (radio iónico del Cu igual a 96 pm).

4.4.2.4. Sistema biomasa oro- resto de los metales

Para los sistemas binarios con oro (ver Figura 4.19 y 4.20), el porcentaje de biosorción fue mayor para oro en todos los sistemas binarios, que para el resto de los elementos analizados (Ca, Cu, Fe, Ti y Al).

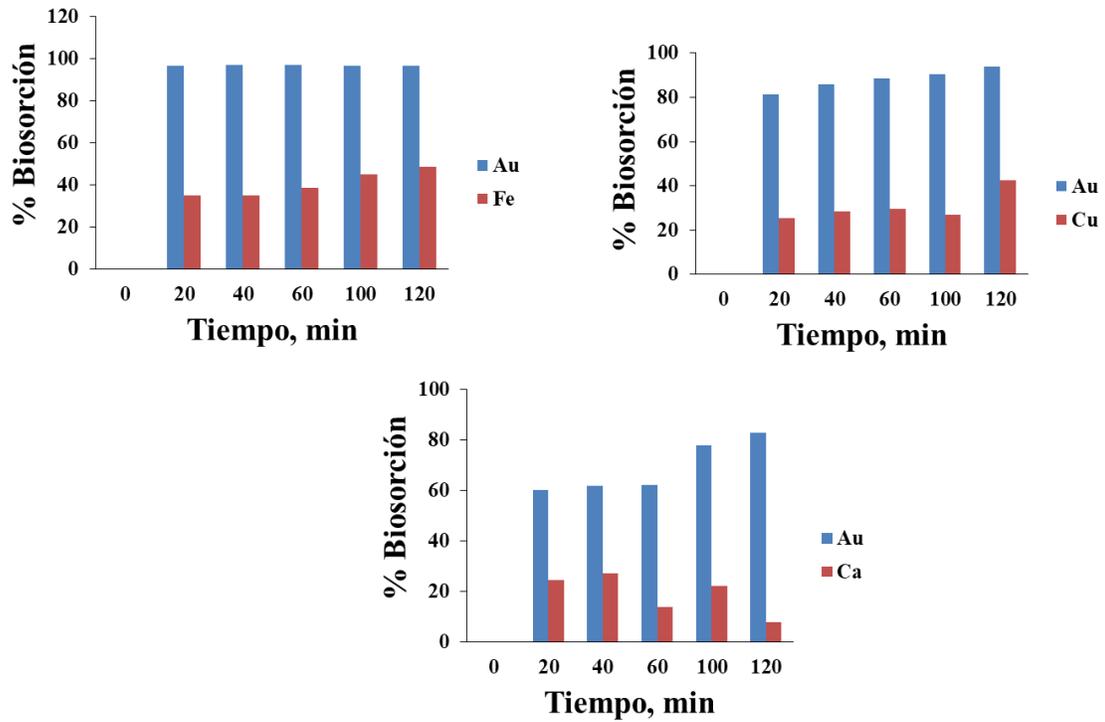


Figura 4.19. Porcentaje de remoción de los sistemas binarios de oro: Au- Fe, Au-Ca, y Au-Cu.

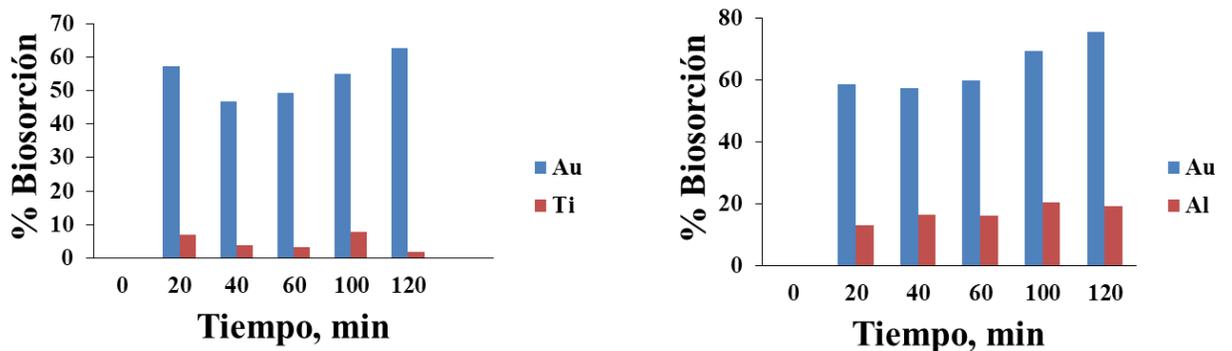


Figura 4.20. Porcentaje de biosorción de los sistemas binarios de oro: Au- Ti y Au-Al.

De los resultados anteriores, aunque en la mayoría de los casos la biosorción de oro no llega al 100%, el resto de metales se adsorben en menor proporción y se puede establecer que la biomasa muerta de *Aspergillus niger* es selectiva para el oro; Al igual que ocurre con las soluciones binarias con platino, la selectividad y el grado de biosorción de los metales depende de las diferencias entre la electronegatividad, el radio iónico y los valores de valencia de los elementos

4.5. Resultados de FT-IR de la biomasa muerta, antes y después del contacto. Solución con platino Biosorción de iones metálicos por el contacto biomasa muerta-solución sintética

En la Figura 4.21 se muestran los espectros de infrarrojo de la biomasa antes y después del contacto con la solución metálica de platino a diferentes rangos de pH (2, 3, 4, 5 y 6). Comparando los espectros, en todos los valores de pH se identifica la banda atribuida a las vibraciones de estiramiento del grupo hidroxilo (O-H, 3419 cm^{-1}), ligeramente modificadas debido a la formación de enlaces de hidrógeno intermoleculares en los polisacáridos de la biomasa y el Pt^{2+} . Las bandas asociadas a los grupos alifáticos (CH_2 y CH) de los ácidos grasos a 2925 cm^{-1} a pH 2, es modificada significativamente, mientras que a pH 3 la banda 2855 cm^{-1} desaparece completamente, y a 1451 cm^{-1} es modificada en todo el rango de pH, lo cual se debe a la formación del enlace covalente entre los grupos alifáticos y el Pt^{2+} ; el resto de los valores de pH de ambas bandas, no presentan una adsorción sustancial, tal vez porque en estos pH se tiene mayor afinidad por otros grupos funcionales.

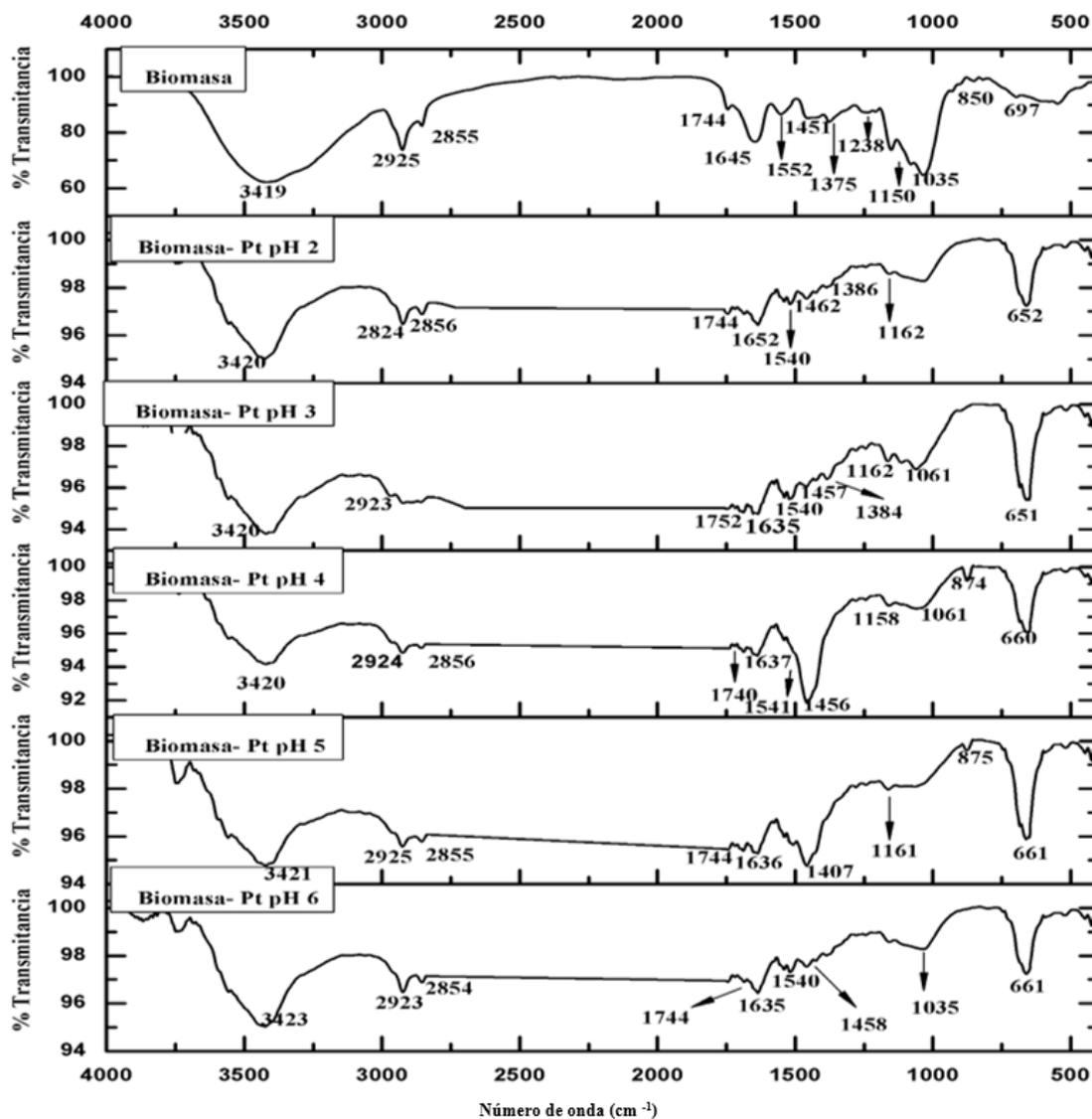


Figura 4.21. Espectro FT-IR de la biomasa y de la biomasa + Pt en un rango de pH de 2-6, antes y después del contacto entre biomasa y la solución sintética.

De la misma figura, la banda asociada al grupo carboxilo, correspondiente a las agrupaciones de amidas ($C=O$, 1645 cm^{-1}), se modifica para todos los rangos de pH, debido a las fuerzas intermoleculares (fuerzas de Van der Waals) formadas entre el $C=O$ y el Pt^{2+} . La banda correspondiente al grupo amino ($N-H$, 1552 cm^{-1}) debido a la deformación de amidas se modifica en todos los valores de pH lo que indica la participación de este grupo en la biosorción de platino.

Una banda más, asociada al grupo carboxilato (COO^- , 1375 cm^{-1}), desaparece a pH 4, 5 y 6, debido a la unión del Pt^{2+} al grupo COO^- . Las bandas a 1150 cm^{-1} y 1035 cm^{-1} correspondientes a las vibraciones de estiramiento de la quitina y de las aminas propias de las fracciones de proteínas (CN^-), son modificadas; la primera se modifica en todos los valores de pH, mientras que, en la segunda banda, se modifica a pH 3 y 4 y desaparece a pH 2 y 5, a pH 6 no ocurre ningún cambio. Estos cambios son atribuidos a la adsorción de Pt^{2+} . Además, se presentan bandas a 850 cm^{-1} y 697 cm^{-1} asociadas al grupo amino (N-H). La banda a 850 cm^{-1} desaparece a pH 2, 3 y 6, el resto de los valores de pH también se ven modificados; en cuanto a la banda 697 cm^{-1} se modifica en todo el rango de pH, debido a la adsorción de platino en el grupo CH (anillo aromático).

Los grupos funcionales principales considerados activos o disponibles para asociarse y capturar los iones metálicos son: los grupos hidroxilo, carboxilos, las aminas alifáticas y los grupos no iónicos.

4.6. Resultados de FT-IR de la biomasa muerta, antes y después del contacto. Solución con oro

De acuerdo a la comparación de los espectros de infrarrojo de la biomasa antes y después de la unión del oro a diferentes rangos de pH (2, 3, 4, 5 y 6) mostrados en la Figura 4.22, se observa lo siguiente: se identifica la banda atribuida a las vibraciones de estiramiento del grupo hidroxilo (O-H , 3419 cm^{-1}), modificadas, debido a la formación de enlaces de hidrógeno intermoleculares en los polisacáridos de la biomasa y el Au^{2+} . Las bandas asociadas a los grupos alifáticos (CH_2 y CH) de los ácidos grasos a 2925 cm^{-1} es ligeramente modifica en todo el rango de pH, mientras que a pH 2, 3, 4, y 6 la banda 2855 cm^{-1} desaparece completamente, y a 1451 cm^{-1} es modificada en todo el rango de pH, siendo la modificación más relevante a pH 4 y 6. Lo anterior descrito, se atribuye a la formación de un enlace covalente entre los grupos alifáticos y el Au^+ .

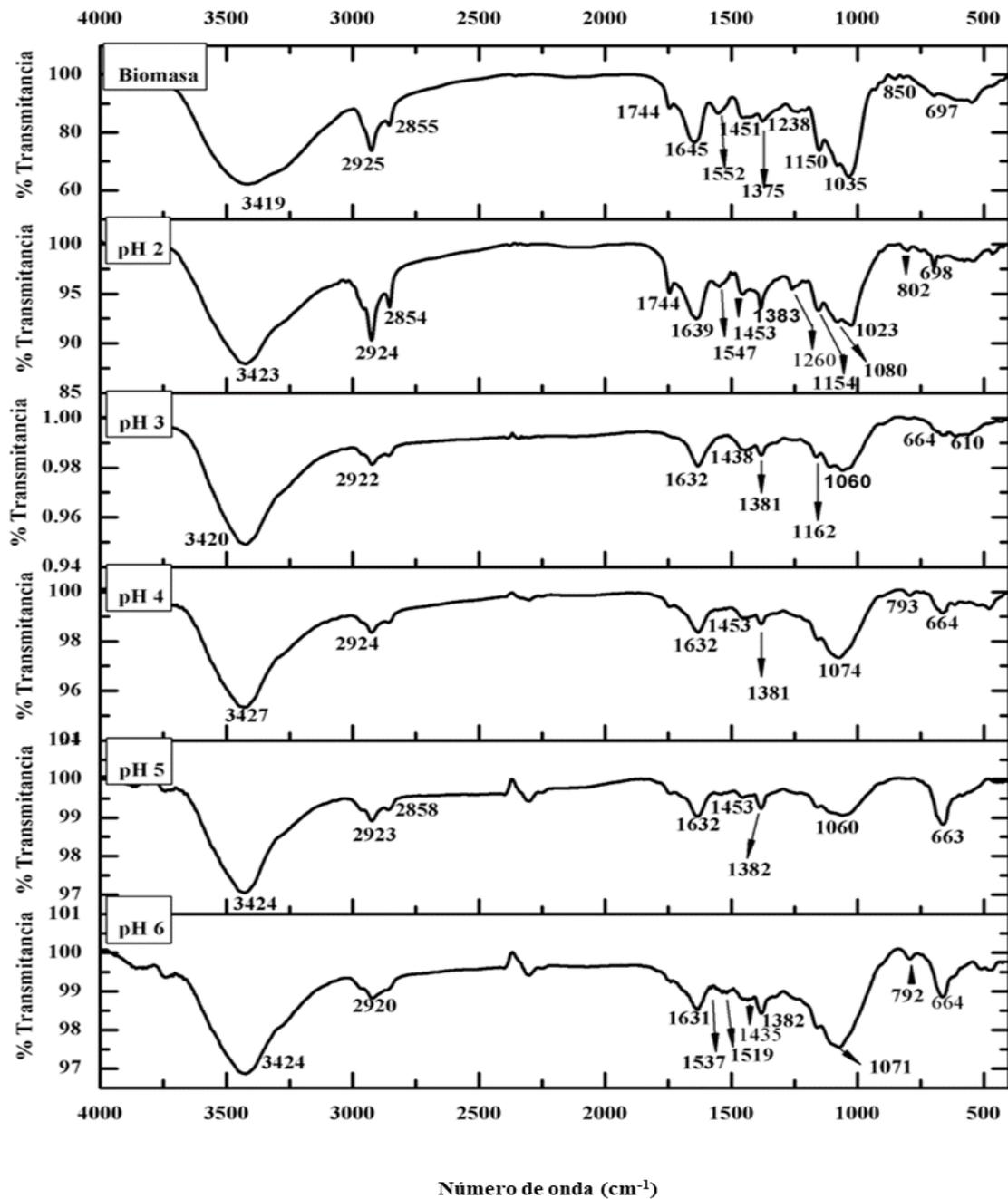


Figura 4.22. Espectro FT-IR de la biomasa y de la biomasa + Au en un rango de pH de 2-6. Antes y después del contacto biomasa-solución sintética.

Continuando con la discusión de la misma figura, las bandas asociadas al grupo carboxilo (C=O), correspondiente a las agrupaciones de amidas, a 1744 cm⁻¹ desaparece a pH 3, 4, 5 y 6, mientras que a 1645 cm⁻¹ se modifica para todos los rangos de pH, debido a las fuerzas intermoleculares (fuerzas de Van der Waals) formadas entre el C=O y el Au⁺. La banda correspondiente al grupo

amino (N-H, 1552 cm^{-1}) debido a la deformación de amidas desaparece a pH 3, 4, 5 y se modifica a pH 2 y 6, lo que indica la participación de este grupo en la biosorción de oro. Una banda más, asociada al grupo carboxilato (COO^- , 1375 cm^{-1}), es modificada en todos los rangos de pH; mientras que la banda correspondiente al grupo C-O (carboxilo) desaparece a pH 3, 4, 5 y 6, debido a la unión del Au^+ al grupo carboxilo (COO^- , C-O).

Las bandas a 1150 cm^{-1} y 1035 cm^{-1} correspondientes a las vibraciones de estiramiento de la quitina y de las aminas propias de las fracciones de proteínas (CN^-), son modificadas; la primera se modifica a pH 2 y 3, y desaparece a pH 4, 5 y 6, mientras que, en la segunda banda, se modifica a todos los valores de pH. Estos cambios son atribuidos a la adsorción de Au^+ . Además, se presentan bandas a 850 cm^{-1} y 697 cm^{-1} asociadas al grupo amino (N-H). La banda a 850 cm^{-1} desaparece a pH 3 y 5, el resto de los valores de pH también se ven modificados; en cuanto a la banda 697 cm^{-1} se modifica en todo el rango de pH. Esto se debe a la adsorción de oro en el grupo CH (anillo aromático).

4.7. Resultados por MEB de la biomasa muerta después del contacto. Solución con oro

El análisis morfológico de la biomasa se realizó por MEB antes y después del proceso de biosorción (Figura 4.23), para determinar diferencias estructurales y superficiales debido al proceso de biosorción de oro y platino. En el caso de la biomasa antes del contacto con los iones metálicos, presenta una morfología con partículas irregulares, rugosas, alargadas y con forma de bastón, lo cual puede ser atribuido a pequeños fragmentos de las hifas. Para la muestra de biomasa después de la biosorción de oro, se identificaron partículas de oro incrustadas en los fragmentos de las hifas del hongo a una amplificación de 5000 x. También se muestran una amplificación a 10000x, donde se resalta la presencia de partículas de oro adheridas a la biomasa.

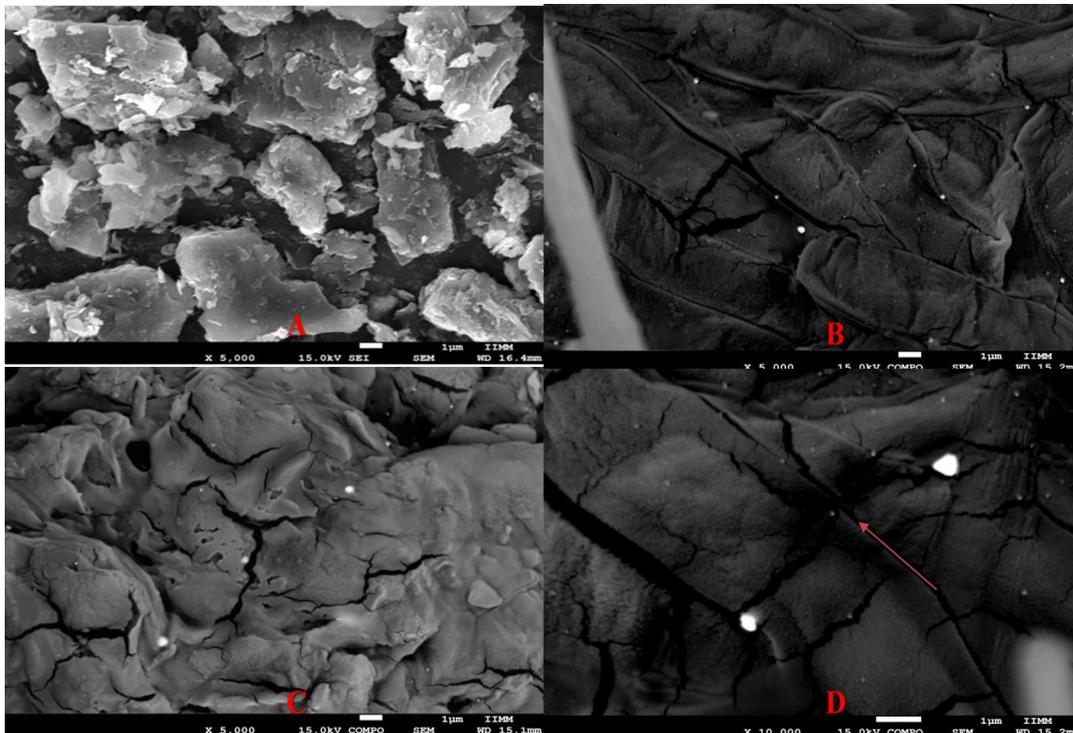


Figura 4.23. Micrografías de A) Biomasa fúngica de *Aspergillus niger* a 5000x; B), C) y D) Biomasa después de la biosorción de oro a 5000x, Biomasa + Au a 10000x y Biomasa + Au a 5000x, respectivamente con partículas de oro en un sistema de una concentración a 20 ppm.

Por su parte, el análisis elemental puntual mostrado en la Figura 4.24 identifica los elementos de la estructura orgánica del hongo, como carbono, oxígeno y magnesio, además de la presencia de precipitados de oro adheridos a las hifas.

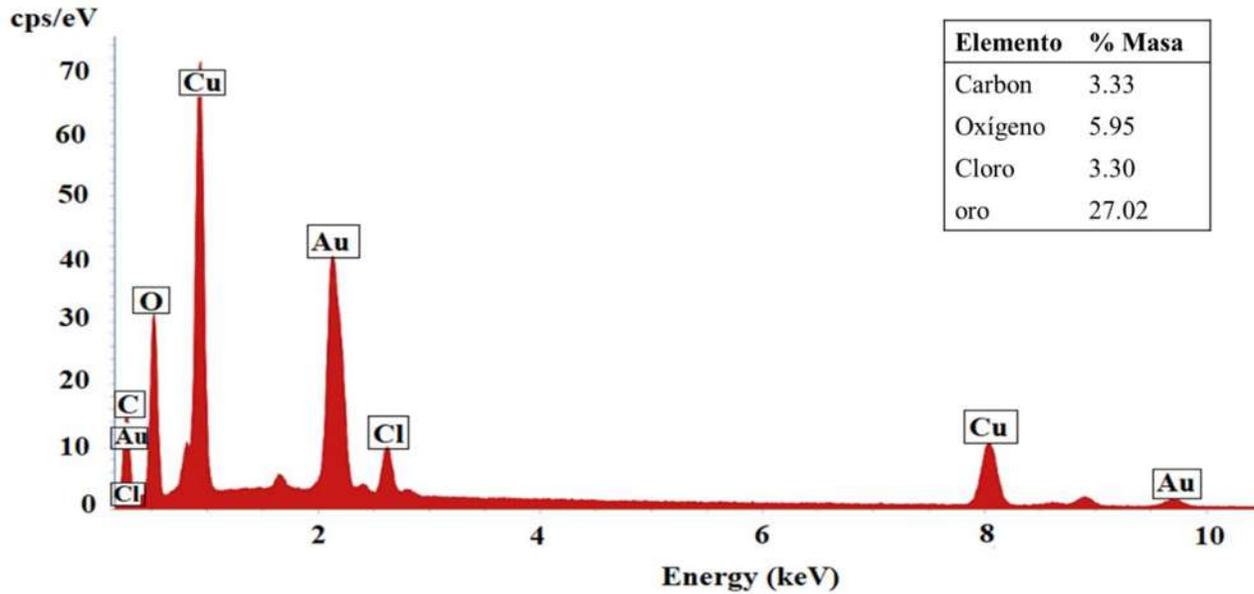


Figura 4.24. Análisis elemental por MEB, correspondiente a la micrografía C) de la Figura 4.25

4.8. Resultados por MEB de la biomasa muerta después del contacto. Solución con platino.

Para las muestras de biomasa luego del contacto con la solución de platino, la Figura 4.25 denota la presencia de esporas del microorganismo; a pesar de no identificar partículas de platino en el hongo, existe presencia de este elemento en la superficie de la biomasa, como se reporta en el análisis elemental mostrado en la Figura 4.26, que indica la composición orgánica del hongo y la presencia de Platino.

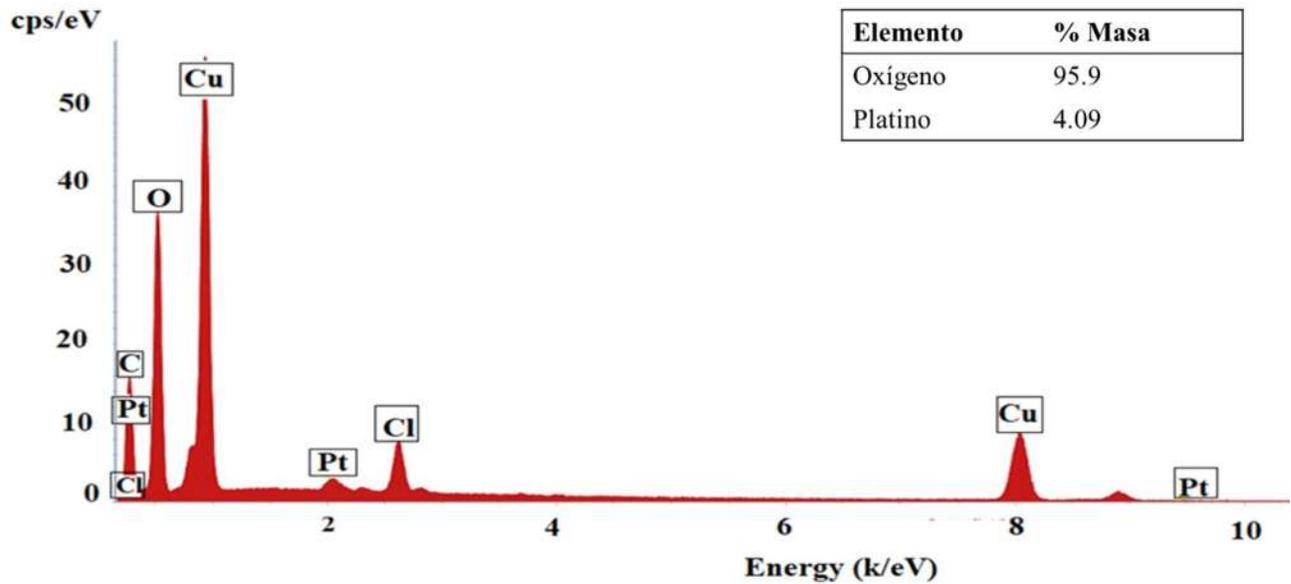
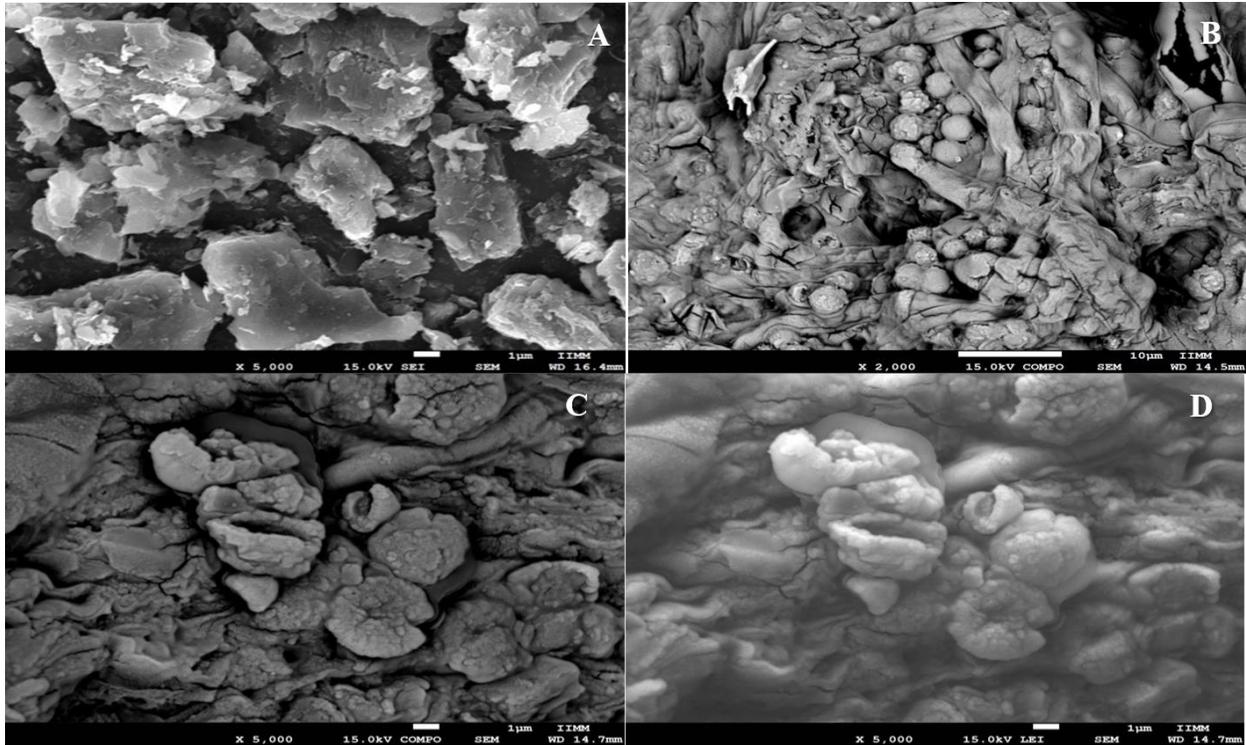


Figura 4.25. Micrografías de A) Biomasa fúngica de *Aspergillus niger* antes del contacto y B), C) y D) Biomasa después del contacto con la solución de platino.

4.9. Caracterización de las soluciones sintéticas antes del contacto mediante espectroscopía UV-Vis. Caso platino y caso oro

Mediante espectroscopía de UV-Vis se obtuvo la absorbancia de las soluciones de platino y oro (por separado) a pH 4 y se comprobó la formación de cloro complejos (ver anexo A para el resto de los metales), los cuales se muestran en los espectros de las Figuras 4.27 y 4.28, para Pt y Au, respectivamente. En el caso de platino (Figura 4.27), se exhibe una banda de absorción a 260 nm correspondiente al PtCl_6^{2-} [55], [56].

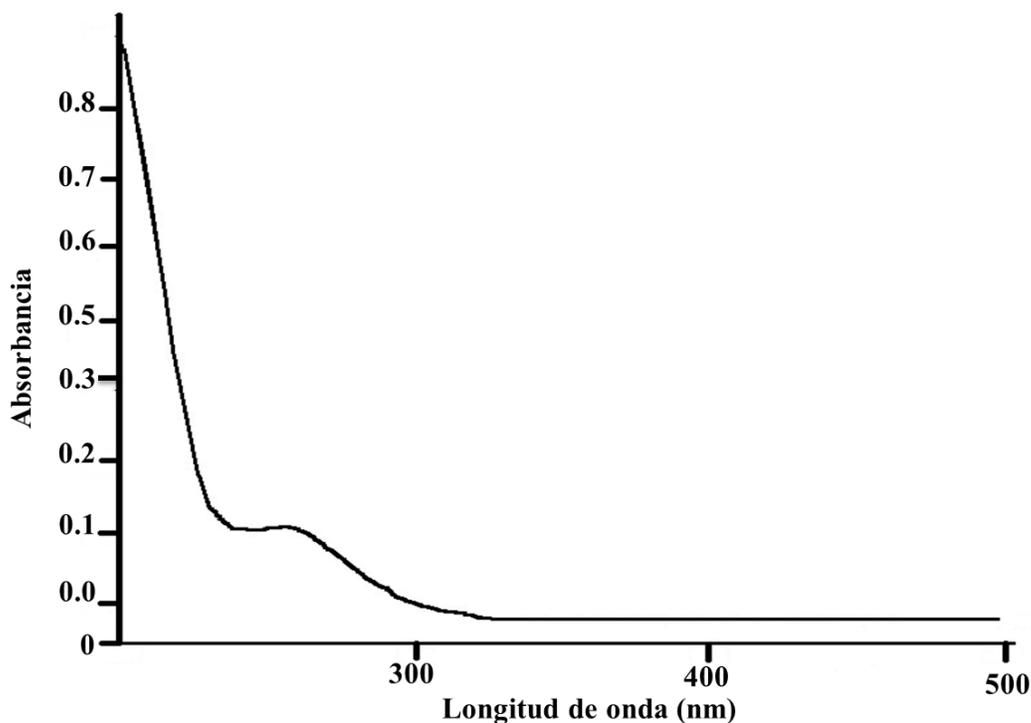


Figura 4.26. Espectro UV-Vis de la solución de platino con un pico a 260 nm correspondiente al compuesto PtCl_6^{2-} .

En la Figura 4.28 se aprecia una banda de absorción a 310 nm correspondiente al compuesto AuCl_4^- [51, 52]; por lo tanto, los cloros complejos identificados (PtCl_6^{2-} y AuCl_4^-) se están adsorbiendo en la superficie de la biomasa. Lo anterior se respalda con la información de los espectros de FT-IR, donde se establece que los compuestos de platino y oro son atraídos por los grupos funcionales presentes en la biomasa de carga positiva o neutra (NH , CH y CH_2).

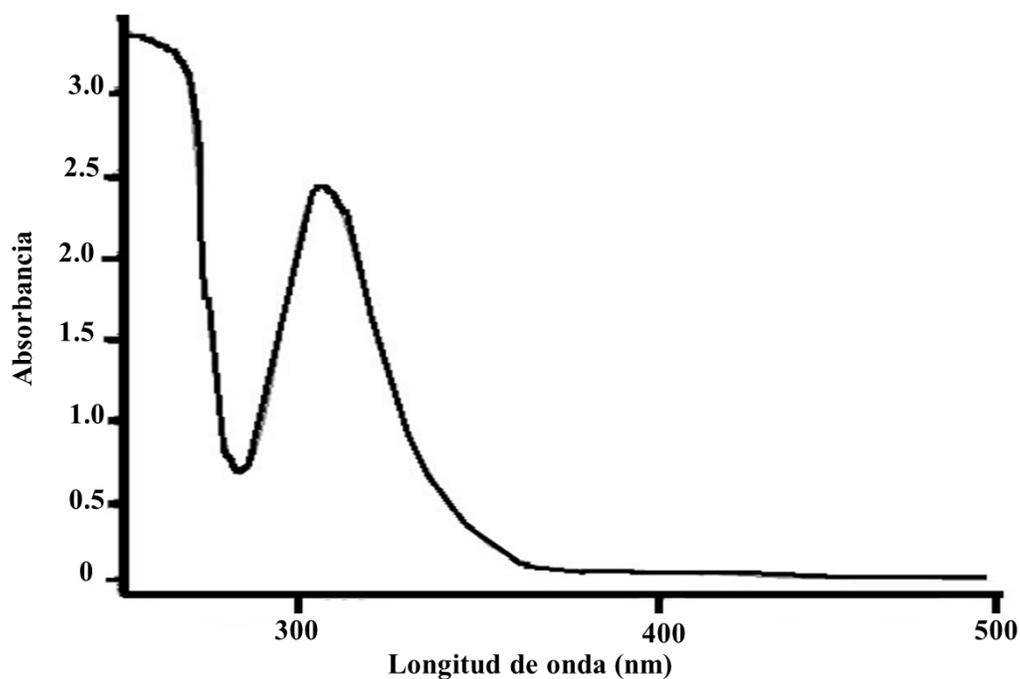


Figura 4.27. Espectro por UV-Vis de la solución de oro que muestra un pico a 310 nm correspondiente al compuesto AuCl_4^- .

4.10. Modelos que describen la cinética de biosorción

4.10.1. Sistema unitario biomasa-platino y biomasa-oro

En las Figuras 4.12 y 4.13 se presentan los resultados experimentales obtenidos en la cinética de biosorción de oro y platino a pH 4. A partir de dichos datos se procedió al análisis matemático de los mismos a fin de identificar el modelo cinético que mejor describe el proceso de biosorción utilizando los modelos: pseudo-primer orden (Lagergren), pseudo-segundo orden y Freundlich.

La determinación de los parámetros de interés y el ajuste a los modelos, se realizó mediante análisis por regresión no lineal con el software Statistica 7.0 mostrados en la Figura 4.29.

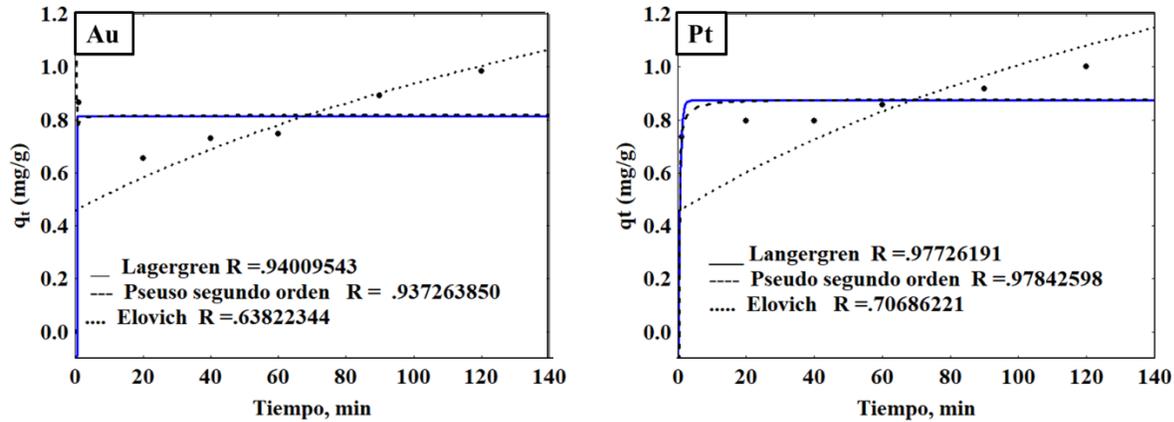


Figura 4.28. Modelos cinéticos para la biosorción de oro y platino en sistemas unitarios.

El modelo que mejor describe los datos experimentales de adsorción es el modelo de pseudo-primer orden ó ecuación de Lagergren y pseudo segundo orden para el sistema de oro y platino respectivamente, los coeficientes de correlación para la biosorción de oro platino son más altos que para los otros dos modelos restantes.

En la Tabla 4.7 se muestran los parámetros de la cinética de biosorción, obtenidos de los ajustes a los modelos de cinética probados en este estudio.

Tabla 4.7. Capacidad de retención al equilibrio (q_e), constante de velocidad de adsorción (k) y coeficiente de correlación (R^2) de los sistemas unitarios Au y Pt.

	Pseudo primer orden			Pseudo-segundo orden			Elovich		
	K_L	q_e	R	K_L	q_e	R	K_L	q_e	R
Au	18.97729	0.81244	0.940095	31.98847	0.818111	0.93726	0.012654	1.367912	0.63822
Pt	1.848836	0.873712	0.977261	5.572047	0.878901	0.97842	0.015316	1.360318	0.7068622

4.10.2. Sistema binario biomasa-platino-oro

A partir de los datos de la cinética de biosorción del sistema Pt-Au mostrados en la Figura 4.14, se procedió al análisis matemático a fin de identificar el modelo cinético que mejor describe el proceso de biosorción utilizando los modelos: pseudo-primer orden (Lagergren) y pseudo-segundo orden.

La determinación de los parámetros de interés y el ajuste a los modelos, se realizó mediante un análisis por regresión no lineal con el software Statistica 7.0® mostrados en la Figura 4.30.

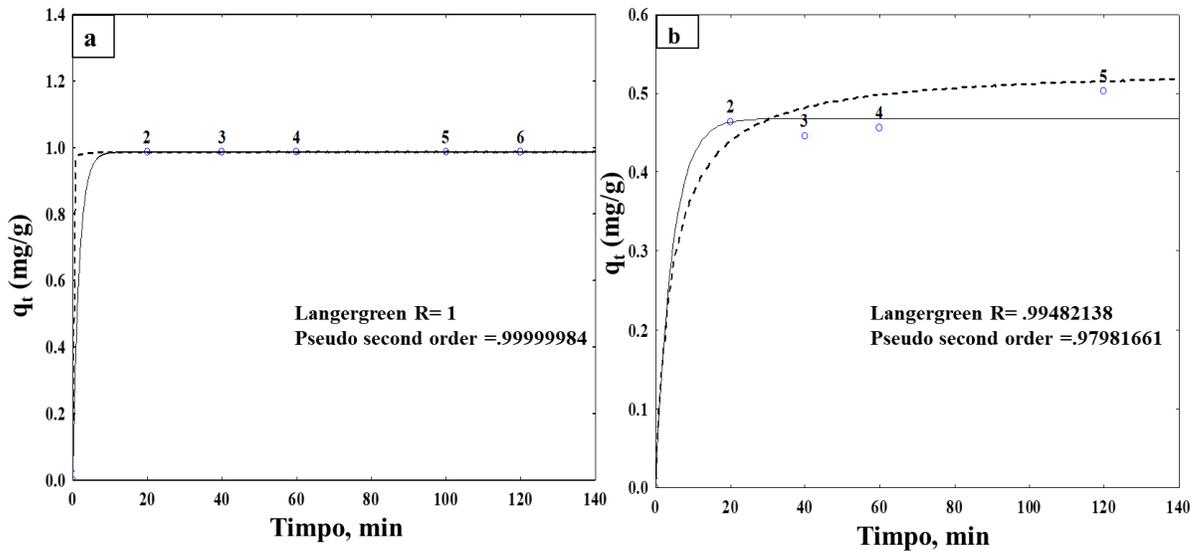


Figura 4.29. Modelos cinéticos para la biosorción del sistema binario platino-oro (a y b, respectivamente).

El modelo que mejor describe los datos experimentales de adsorción es el modelo de pseudo-primer orden ó ecuación de Lagergren; para ambos casos, los coeficientes de correlación para la biosorción de platino y oro son más altos que para los otros dos modelos

En la Tabla 4.8 se muestran los parámetros de la cinética de biosorción, obtenidos de los ajustes a los modelos de cinética probados en este estudio.

Tabla 4.8. Capacidad de retención al equilibrio (q_e), constante de velocidad de adsorción (k) y coeficiente de correlación (R^2) del sistema Pt-Au.

Pseudo primer orden			Pseudo-segundo orden		
K (g/mg·min)	q _e (mg/g)	R ²	k (g/mg·min)	q _e (mg/g)	R ²
0.05984	0.9862	1	0.01507	-	0.9999
0.1192	0.4995	0.9948	2.3219	0.2301	0.9798

El valor de $k=0.5984$ g/mg.min para platino y de $K=0.1192$ g/mg.min para oro, indica la velocidad de biosorción en el modelo de Pseudo primer orden.

4.11. Efecto de la relación biomasa-metal en la selectividad y extensión de la adsorción

4.11.1. Cantidad de biomasa óptima

La Figura 4.31 muestra la extensión de la adsorción por parte de la biomasa muerta de *Aspergillus niger*, para el caso de la solución binaria de oro y platino (20 mg/L de cada metal). Los resultados experimentales indican que, en el caso del platino, la capacidad de biosorción alcanza un máximo desde los primeros minutos del contacto, independientemente del incremento en la cantidad de biomasa. En lo que respecta al oro, su adsorción se incrementa con la cantidad de biomasa hasta recuperar el 96 % del metal inicial en solución a los 120 minutos de iniciado el contacto. En este último caso se establece que el aumento de la superficie adsorbente ofrece mayor número de sitios disponibles o activos para la adsorción.

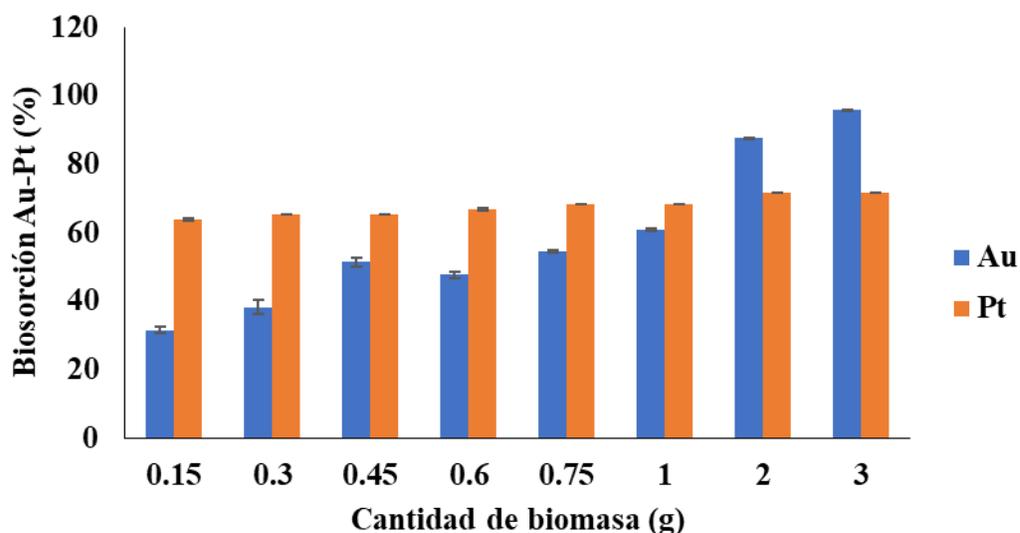


Figura 4.30. Cantidad óptima de biomasa muerta (g) de *Aspergillus niger* para oro y platino.

De la información mostrada en la Tabla 4.6, se observa que el hongo en contacto con la solución sintética, adsorbe selectivamente el platino; sin embargo, al agotar los grupos funcionales en la biomasa, afines a la especie iónica de platino, esta adsorción alcanza un máximo. Por otra parte, las especies iónicas de oro encuentran menos sitios activos o grupos funcionales disponibles en la biomasa, mismos que aumentan con la cantidad de masa muerta de *Aspergillus niger*, alcanzando recuperaciones más elevadas con respecto a las de platino.

Tabla 4.9. Porcentaje de recuperación en función de la concentración de biomasa muerta *Aspergillus niger*.

Cantidad de biomasa (g)	% Biosorción Au	% Biosorción Pt
0.15	31.51	63.75
0.3	38.20	65.31
0.45	51.42	65.31
0.6	47.65	66.88
0.75	54.48	68.44
1	60.73	68.44
2	87.47	71.56
3	95.76	71.56

Las Figuras 4.32 y 4.33 muestran la capacidad de adsorción de la biomasa muerta de *Aspergillus niger*, para los casos de soluciones binarias que contienen oro o platino, mezclados con concentraciones conocidas de cualquiera de los metales calcio, hierro, cobre o aluminio.

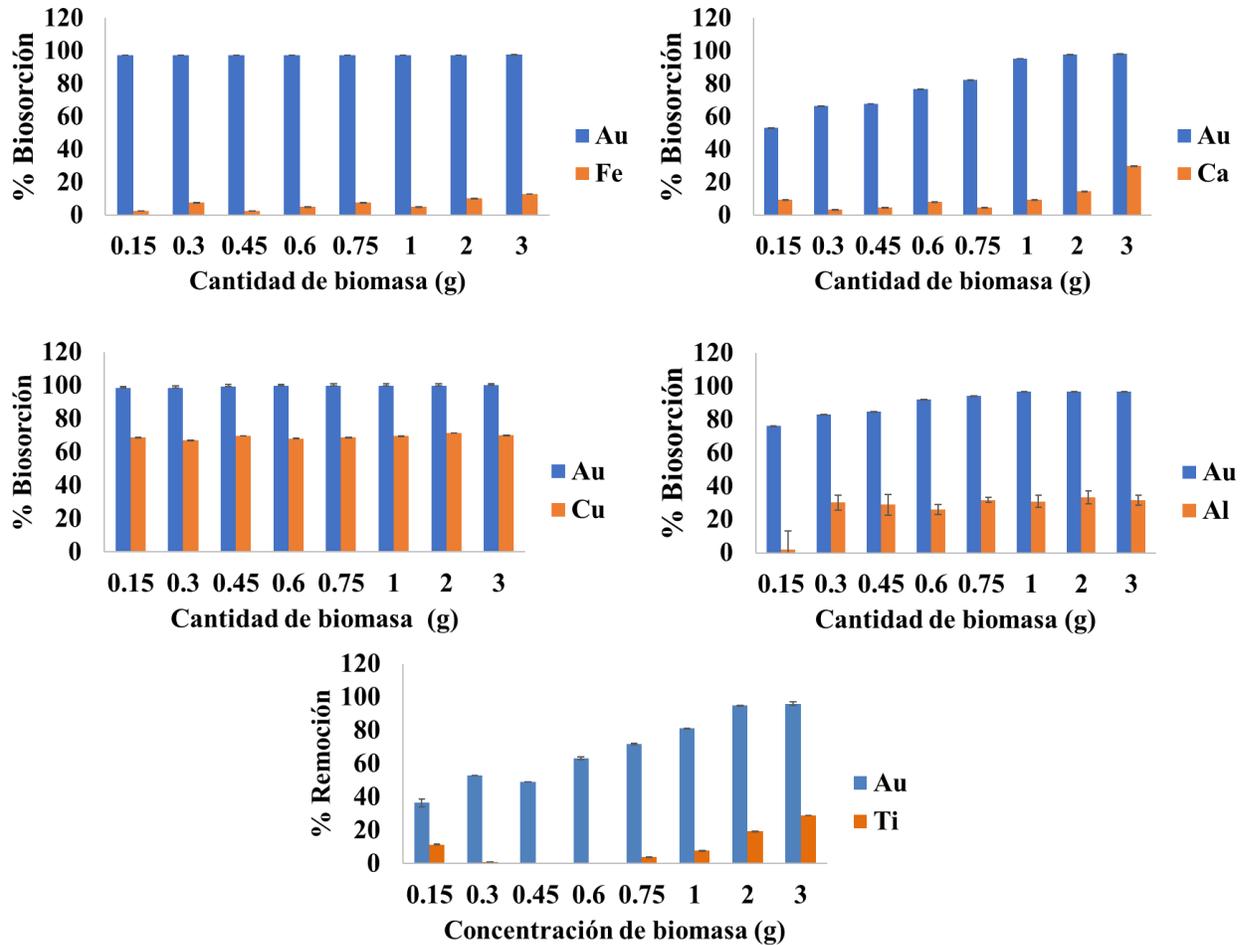


Figura 4.31. Concentración óptima de biomasa muerta de *Aspergillus niger* para recuperaciones máximas de metales en los sistemas Au-Fe, Au-Ca, Au-Cu y Au-Al.

Como se aprecia, el oro se bioadsorbe casi por completo, selectiva o preferentemente desde el inicio del contacto en las cuatro soluciones binarias experimentadas. Se observa que las especies de hierro y calcio son incipientemente atraídas por los grupos funcionales de la biomasa; las especies de aluminio y titanio son escasamente atraídas, contrario a las especies de cobre que son recuperadas hasta en 60% con respecto al contenido inicial. Al igual que en el caso del platino, las especies iónicas de los metales calcio, cobre, aluminio y fierro, la capacidad de ser adsorbidas depende de los grupos funcionales afines a ellos, en la superficie de la biomasa [34].

En la Figura 4.33 se presentan los resultados experimentales de bioadsorción para el caso de las soluciones binarias de platino y alguno de los metales calcio, fierro, cobre, aluminio o titanio. En todos los casos el platino se adsorbe preferentemente que los otros cuatro metales, aunque el porcentaje de recuperación oscila entre el 60 y 90%, dependiendo de los grupos funcionales disponibles en la biomasa o de la selectividad de la biomasa por el metal; por ejemplo, para el sistema Pt-Fe la máxima recuperación de platino es de 70% y aparentemente no depende en gran medida de la cantidad de biomasa, más bien de los grupos funcionales afines a las especies de platino en solución. En este sistema la biomasa prácticamente no atrae o captura especies del metal fierro. El sistema binario Pt-Cu y Pt-Ti observa un comportamiento similar al anterior. Para las soluciones binarias Pt-Ca y Pt-Al, la adsorción de las especies de calcio y aluminio no dependen de la cantidad de biomasa, solo de los grupos funcionales afines a estas especies, alcanzando recuperaciones que oscilan en 30%. De manera general se puede establecer que la cantidad de especies de platino adsorbidas por la biomasa dependen de los grupos funcionales afines a estas especies, sin llegar a recuperaciones cercanas al 100% [34].

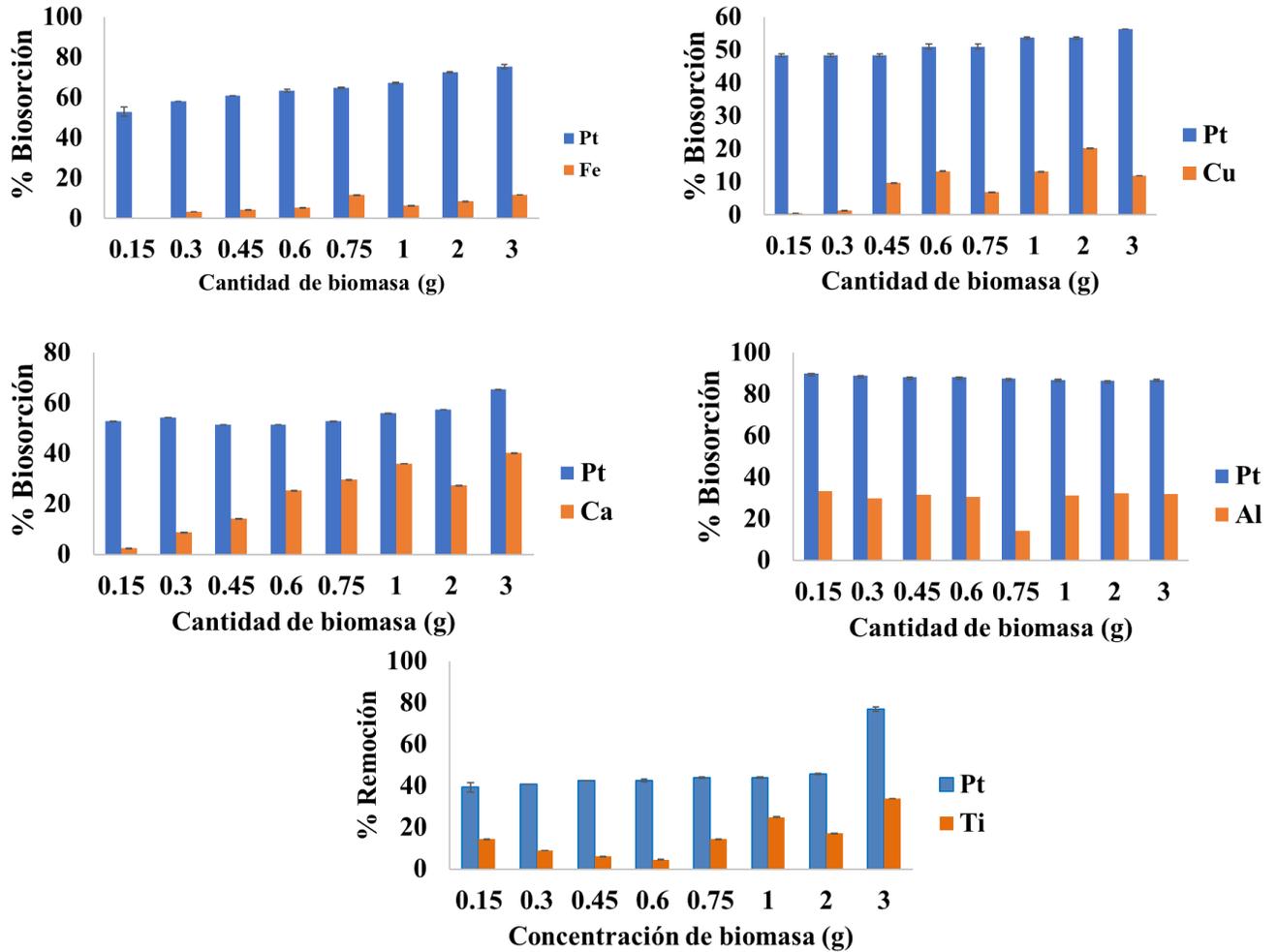


Figura 4.32. Concentración óptima de biomasa muerta de *Aspergillus niger* para los sistemas Pt-Fe, Pt-Ca, Pt-Cu y Pt- Al.

4.11.2. Variaciones del pH, Conductividad eléctrica y ORP

Durante los experimentos de contacto biomasa-solución preñada, se registraron los valores del pH, conductividad eléctrica y potencial óxido reducción, con la finalidad de establecer algún posible cambio por el aumento de masa del hongo, además de identificar la o las especies en equilibrio de acuerdo a los correspondientes diagramas de Pourbaix [9, 16], bajo las correspondientes condiciones experimentales. En la Tabla 2 se muestran estas variaciones durante la experimentación para el sistema Pt-Au. Como se aprecia, el pH varía levemente y permanece en el rango que descarta la formación de fases sólidas o en solución que modifiquen la cinética de bioadsorción.

Tabla 4.10. Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP), en las soluciones binarias durante los experimentos de bioadsorción. Sistema binario Pt-Au.

Cantidad de biomasa (g)	pH	Conductividad eléctrica, S/m	ORP (RmV)
0.15	3.65	3.8	993
0.3	3.64	4.8	1003
0.45	3.65	4	1001
0.6	3.45	4.1	1003
0.75	3.7	4	997
1	3.77	3.8	998
2	3.76	3.8	981
3	3.82	3.8	954

Se observa que para las cantidades de biomasa de 0.15, 0.30 y 0.45 gramos el pH permanece constante en 3.64, mientras que a 0.65 gramos de biomasa el pH disminuye a 3.45, para posteriormente incrementar gradualmente conforme aumentan los gramos de biomasa hasta ubicarse en 3.82; esto, es debido a que en la pared celular se lleva a cabo la protonación o la desprotonación de los grupos funcionales, proceso requerido para que se lleve a cabo la biosorción, por lo que al incrementar el pH hay una intensificación de las fuerzas electrostáticas involucradas en el proceso de adsorción de los sitios activos, y consecuentemente los sitios activos sobre la pared celular se desprotonan y aumenta la carga negativa con un incremento del enlace de los metales a los grupos funcionales de la biomasa microbiana; por otra parte, a pH ácidos los sitios de adsorción disponibles son saturados por los protones ya que hay más de éstos en la solución puesto que los metales existen como iones libres [16, 17] .

En cuanto a la variación de la conductividad eléctrica en el medio acuoso, se observa que ésta prácticamente no cambia y las variaciones son normales por el “ruido” electrónico del potenciómetro. La poca variación de los valores de conductividad son producto de la baja concentración en partes por millón de iones metálicos al inicio y durante el contacto hongo-solución.

También se registraron los cambios en el potencial de óxido reducción (ORP), la Figura 4.34 compara estos valores de ORP con los correspondientes diagramas de Pourbaix de los sistemas Pt-H₂O-HCl y Au-H₂O-HCl [53]. Se comprueba que, de acuerdo al pH de la experimentación, las especies acuosas presentes son cloruros y no existe algún tipo de precipitados o compuestos entre el platino y el oro, solamente compuestos clorados de oro o de platino; lo anterior, independientemente de la cantidad de biomasa.

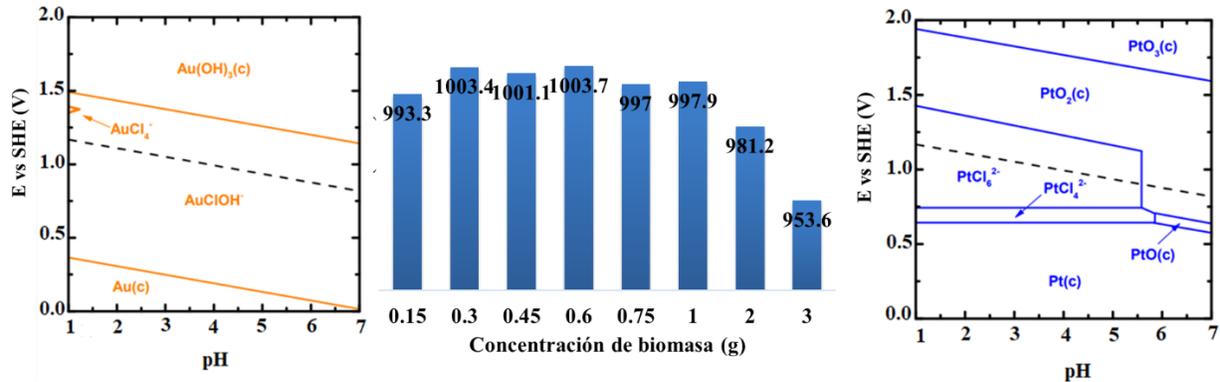


Figura 4.33. Localización de las especies acuosas formadas durante la experimentación, de acuerdo a los diagramas de Pourbaix para los sistemas Pt-H₂O-HCl y Au-H₂O-HCl [59].

CONCLUSIONES

Del estudio del mecanismo de biosorción de oro y platino en soluciones acuosas mediante biomasa muerta de *Aspergillus niger*, se derivan las siguientes conclusiones:

- Se recuperó selectivamente platino y oro de una solución preñada con los metales Fe, Cu, Ti, Al por biosorción selectiva, aplicando la biomasa muerta de *Aspergillus niger*.

De la caracterización del mineral de platino se derivan las siguientes conclusiones:

- Las especies identificadas en el mineral de platino por la técnica de FRX son: cuarzo (principalmente), albita, hematita (minerales de hierro) y sanidina.
- El resultado obtenido del análisis químico cuantitativo por la técnica de Espectroscopía absorción atómica realizado al mineral de cabeza, indica que éste contiene 6.78 gramos por

tonelada de oro y 136.27 gramos por tonelada de platino.

- La determinación de oro y platino en el mineral por la técnica de Espectroscopia de absorción atómica a través de la digestión con agua regia + HF + H₃BO₄, demuestran que gran parte de estos metales se encuentran encapsulados en la fase de silicio.

De la caracterización de la biomasa muerta *Aspergillus niger*, se derivan lo siguiente:

- Se identificó macroscópica y microscópica del hongo *Aspergillus niger*.
- Los análisis por FT-IR muestran los principales grupos funcionales presentes en la biomasa del hongo *Aspergillus niger* involucrados en el proceso de biosorción de iones metálicos, siendo éstos los grupos amino, hidroxilo, carboxilo y nitro.
- El análisis elemental por SEM del hongo después del contacto con la solución impregnada confirma la presencia de oro y platino en la estructura morfológica del hongo.
- Los espectros de infrarrojo muestran que los grupos funcionales de carga positiva o neutra (N-H, C-H y C-H₂) en la superficie de la biomasa son los responsables de atrapar los compuestos iónicos en forma de cloruros (PtCl₆²⁻, AuCl₄⁻), identificados por latécnica de UV-Vis y en acorde con los respectivos diagramas de Pourbaix.

De la biosorción de oro y platino a partir de soluciones sintéticas separadas, utilizando biomasa muerta del hongo *Aspergillus niger*, se extraen las siguientes conclusiones:

- En las soluciones con 20 ppm de oro y 20 ppm de platino, por separado, se verificó la ausencia de precipitados metálicos en el rango de pH de 2 a 6.
- La biomasa muerta de *Aspergillus niger* en contacto por separado con las soluciones sintéticas adsorbió el 100% del metal en solución, a pH 4 y 6; a diferentes pH, la limitación son los sitios activos en la biomasa para atraer y atrapar iones metálicos.

De los experimentos de contacto entre masa muerta de *Aspergillus niger* y mezclas líquidas sintéticas binarias compuestas de platino u oro mezclados por separado con cada uno de los metales Ca, Fe, Al, Cu, y Ti, a pH 4, se deriva lo siguiente:

- Para los sistemas binarios con platino, este metal se biosorbió primero en el caso de



calcio, hierro y aluminio; sin embargo, hay una competencia en la biosorción con cobre y titanio, donde la extensión de la bioadsorción depende del radio iónico y electronegatividad de los metales en solución.

- En los sistemas binarios con oro, aunque el oro se adsorbe preferentemente, existe más competencia que con respecto a las soluciones con platino.

Para la mezcla platino-oro, la selectividad de adsorción es para el platino al recuperar el 100%, mientras que el oro se recuperó al 50%, al parecer limitado por la cantidad de biomasa o de sitios activos disponibles para la bioadsorción.

De los experimentos de biosorción de oro, platino y otros metales, a pH 4 y variando la masa del hongo *Aspergillus niger*, se concluye lo siguiente:

- En general la bioadsorción es selectiva para el oro y después para el platino. En el caso del oro se bioadsorbe casi el 100%, mientras que el platino el límite de recuperación es del 71%.
- La recuperación del hierro es menor al 10%, hasta 30% para el calcio y aluminio, y del 60% para el cobre.
- La extensión de la bioadsorción no depende de la cantidad de biomasa incluida en este trabajo, el incremento en la biomasa no necesariamente significa aumento de los sitios activos o grupos funcionales afines a los metales en solución.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Ramesh, H. Hasegawa, W. Sugimoto, T. Maki, y K. Ueda, «Adsorption of gold(III), platinum(IV) and palladium(II) onto glycine modified crosslinked chitosan resin», *Bioresour. Technol.*, vol. 99, n.º 9, pp. 3801-3809, jun. 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.07.008.
- [2] M. K. Jha, J. Lee, M. Kim, J. Jeong, B.-S. Kim, y V. Kumar, «Hydrometallurgical recovery/recycling of platinum by the leaching of spent catalysts: A review», *Hydrometallurgy*, vol. 133, pp. 23-32, feb. 2013, doi: 10.1016/j.hydromet.2012.11.012.
- [3] A. Sari, D. Mendil, M. Tuzen, y M. Soylak, «Biosorption of palladium(II) from aqueous solution by moss (*Racomitrium lanuginosum*) biomass: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies», *J. Hazard. Mater.*, vol. 162, n.º 2-3, pp. 874-879, mar. 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.05.112.
- [4] F. M. Doyle, «Developments in Hydrometallurgy», *JOM*, vol. 40, n.º 4, pp. 32-38, abr. 1988, doi: 10.1007/BF03259019.

- [5] R. S. Dobson y J. E. Burgess, «Biological treatment of precious metal refinery wastewater: A review», *Miner. Eng.*, vol. 20, n.º 6, pp. 519-532, may 2007, doi: 10.1016/j.mineng.2006.10.011.
- [6] J. Mao, S. W. Won, K. Vijayaraghavan, y Y.-S. Yun, «Surface modification of *Corynebacterium glutamicum* for enhanced Reactive Red 4 biosorption», *Bioresour. Technol.*, vol. 100, n.º 3, pp. 1463-1466, feb. 2009, doi: 10.1016/j.biortech.2008.07.053.
- [7] N. Das, «Recovery of precious metals through biosorption — A review», *Hydrometallurgy*, vol. 103, n.º 1, pp. 180-189, jun. 2010, doi: 10.1016/j.hydromet.2010.03.016.
- [8] N. Tewari, P. Vasudevan, y B. K. Guha, «Study on biosorption of Cr(VI) by *Mucor hiemalis*», *Biochem. Eng. J.*, vol. 23, n.º 2, pp. 185-192, abr. 2005, doi: 10.1016/j.bej.2005.01.011.
- [9] Y. P. Ting, W. K. Teo, y C. Y. Soh, «Gold uptake by *Chlorella vulgaris*», *J. Appl. Phycol.*, vol. 7, n.º 1, pp. 97-100, feb. 1995, doi: 10.1007/BF00003557.
- [10] M. Hosea, B. Greene, R. Mcpherson, M. Henzl, M. Dale Alexander, y D. W. Darnall, «Accumulation of elemental gold on the alga *Chlorella vulgaris*», *Inorganica Chim. Acta*, vol. 123, n.º 3, pp. 161-165, mar. 1986, doi: 10.1016/S0020-1693(00)86339-2.
- [11] F. J. Alguacil, «El refinado de los metales del grupo del platino», p. 10.
- [12] C. Rao y D. Trivedi, «Chemical and electrochemical depositions of platinum group metals and their applications», *Coord. Chem. Rev.*, vol. 249, n.º 5-6, pp. 613-631, mar. 2005, doi: 10.1016/j.ccr.2004.08.015.
- [13] H. Dong, J. Zhao, J. Chen, Y. Wu, y B. Li, «Recovery of platinum group metals from spent catalysts: A review», *Int. J. Miner. Process.*, vol. 145, pp. 108-113, dic. 2015, doi: 10.1016/j.minpro.2015.06.009.
- [14] K. W. Kolasinski, *Surface Science: Foundations of Catalysis and Nanoscience*. John Wiley & Sons, 2012.
- [15] F. Veglio y F. Beolchini, «Removal of metals by biosorption: a review», *Hydrometallurgy*, vol. 44, n.º 3, pp. 301-316, mar. 1997, doi: 10.1016/S0304-386X(96)00059-X.
- [16] D. D. L. Vullo, «MICROORGANISMOS Y METALES PESADOS: UNA INTERACCIÓN EN BENEFICIO DEL MEDIO AMBIENTE», p. 13.
- [17] N. Kuyucak y B. Volesky, «Biosorbents for recovery of metals from industrial solutions», *Biotechnol. Lett.*, vol. 10, n.º 2, pp. 137-142, feb. 1988, doi: 10.1007/BF01024641.
- [18] S. Shamim, «Biosorption of Heavy Metals», en *Biosorption*, J. Derco y B. Vrana, Eds., InTech, 2018. doi: 10.5772/intechopen.72099.
- [19] M. García Ríos, «Biosorción de cadmio con raspo de uva. Aproximación a la monitorización del proceso mediante sensores químicos», jun. 2008, Accedido: 3 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/5503>
- [20] M. Arnaiz Pérez, «Valorización de rapa como bioadsorbente para la eliminación de plomo de efluentes acuosos», dic. 2006, Accedido: 3 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3694>
- [21] M. Tsezos y B. Volesky, «The mechanism of thorium biosorption by *Rhizopus arrhizus*», *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 24, n.º 4, pp. 955-969, 1982, doi: 10.1002/bit.260240415.
- [22] M. Tsezos y B. Volesky, «The mechanism of uranium biosorption by *Rhizopus arrhizus*», *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 24, n.º 2, pp. 385-401, 1982, doi: 10.1002/bit.260240211.
- [23] Md. N. Akthar, K. S. Sastry, y P. M. Mohan, «Mechanism of metal ion biosorption by fungal biomass», *Biometals*, vol. 9, n.º 1, pp. 21-28, ene. 1996, doi: 10.1007/BF00188086.

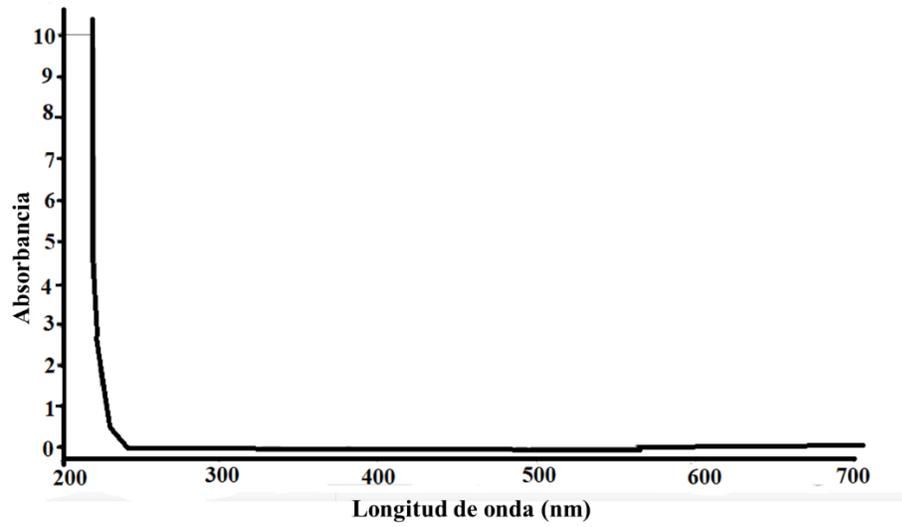
- [24] H. Bruuer, «Adsorption Technology: A Step-by-step Approach to Process Evaluation and Application. Herausgeg. von F. L. Slejko. Marcel Dekker. Inc., New York-Basel 1985. X, 240 S., zahlr. Abb. u. Tab., geb., \$ 55,-», *Chem. Ing. Tech.*, vol. 58, n.º 6, pp. 531-531, 1986, doi: 10.1002/cite.330580625.
- [25] Y.-S. Ho, «Review of second-order models for adsorption systems», *J. Hazard. Mater.*, vol. 136, n.º 3, pp. 681-689, ago. 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.12.043.
- [26] J. Febrianto, A. N. Kosasih, J. Sunarso, Y.-H. Ju, N. Indraswati, y S. Ismadji, «Equilibrium and kinetic studies in adsorption of heavy metals using biosorbent: A summary of recent studies», *J. Hazard. Mater.*, vol. 162, n.º 2, pp. 616-645, mar. 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.06.042.
- [27] M. I. El-Khaiary, «Least-squares regression of adsorption equilibrium data: Comparing the options», *J. Hazard. Mater.*, vol. 158, n.º 1, pp. 73-87, oct. 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.01.052.
- [28] K. Y. Foo y B. H. Hameed, «Insights into the modeling of adsorption isotherm systems», *Chem. Eng. J.*, vol. 156, n.º 1, pp. 2-10, ene. 2010, doi: 10.1016/j.cej.2009.09.013.
- [29] I. Savvaidis, «Recovery of gold from thiourea solutions using microorganisms», *Biometals*, vol. 11, n.º 2, pp. 145-151, jun. 1998, doi: 10.1023/A:1009234113485.
- [30] Y. N. Mata, E. Torres, M. L. Blázquez, A. Ballester, F. González, y J. A. Muñoz, «Gold(III) biosorption and bioreduction with the brown alga *Fucus vesiculosus*», *J. Hazard. Mater.*, vol. 166, n.º 2, pp. 612-618, jul. 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.11.064.
- [31] N. C. M. Gomes, E. R. S. Camargos, J. C. T. Dias, y V. R. Linardi, «Gold and silver accumulation by *Aspergillus niger* from cyanide-containing solution obtained from the gold mining industry», *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 14, n.º 1, pp. 149-149, ene. 1997, doi: 10.1023/A:1008805423811.
- [32] I. de Vargas, L. E. Macaskie, y E. Guibal, «Biosorption of palladium and platinum by sulfate-reducing bacteria», *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 79, n.º 1, pp. 49-56, 2004, doi: 10.1002/jctb.928.
- [33] Md. Naseem Akhtar, K. Sivarama Sastry, y P. Maruthi Mohan, «Biosorption of silver ions by processed *Aspergillus niger* biomass», *Biotechnol. Lett.*, vol. 17, n.º 5, pp. 551-556, may 1995, doi: 10.1007/BF00132027.
- [34] B. Godlewska-Żyłkiewicz, S. Sawicka, y J. Karpińska, «Removal of Platinum and Palladium from Wastewater by Means of Biosorption on Fungi *Aspergillus* sp. and Yeast *Saccharomyces* sp.», *Water*, vol. 11, n.º 7, Art. n.º 7, jul. 2019, doi: 10.3390/w11071522.
- [35] E. Schuster, N. Dunn-Coleman, J. Frisvad, y P. van Dijck, «On the safety of *Aspergillus niger* – a review», *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 59, n.º 4, pp. 426-435, ene. 2002, doi: 10.1007/s00253-002-1032-6.
- [36] J. A. B. Trujillo, *Micología médica básica (5a. ed.)*. McGraw-Hill Interamericana Editores, 2015.
- [37] J. Pontón, «La pared celular de los hongos y el mecanismo de acción de la anidulafungina», *Rev. Iberoam. Micol.*, vol. 25, n.º 2, pp. 78-82, jun. 2008, doi: 10.1016/S1130-1406(08)70024-X.
- [38] S. M. Bowman y S. J. Free, «The structure and synthesis of the fungal cell wall», *BioEssays*, vol. 28, n.º 8, pp. 799-808, 2006, doi: 10.1002/bies.20441.
- [39] F. W. Chattaway, M. R. Holmes, y A. J. E. Y. 1968 Barlow, «Cell Wall Composition of the Mycelial and Blastospore Forms of *Candida albicans*», *Microbiology*, vol. 51, n.º 3, pp. 367-376, doi: 10.1099/00221287-51-3-367.

- [40] A. Beauvais, T. Fontaine, V. Aimanianda, y J.-P. Latgé, «Aspergillus Cell Wall and Biofilm», *Mycopathologia*, vol. 178, n.º 5, pp. 371-377, dic. 2014, doi: 10.1007/s11046-014-9766-0.
- [41] «PCB_D_Tesis_2019_Yamily_Burgos_Canul.pdf». Accedido: 3 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1579/1/PCB_D_Tesis_2019_Yamily_Burgos_Canul.pdf
- [42] E. Schuster, N. Dunn-Coleman, J. Frisvad, y P. van Dijck, «On the safety of *Aspergillus niger* – a review», *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 59, n.º 4, pp. 426-435, ene. 2002, doi: 10.1007/s00253-002-1032-6.
- [43] S. E. Baker, «*Aspergillus niger* genomics: Past, present and into the future», *Med. Mycol.*, vol. 44, n.º Supplement_1, pp. S17-S21, sep. 2006, doi: 10.1080/13693780600921037.
- [44] T. C. Cairns, C. Nai, y V. Meyer, «How a fungus shapes biotechnology: 100 years of *Aspergillus niger* research», *Fungal Biol. Biotechnol.*, vol. 5, n.º 1, p. 13, dic. 2018, doi: 10.1186/s40694-018-0054-5.
- [45] «INV E-707-07 Gravedad Específica de Los Materiales Asfálticos Sólidos y Semisólidos. Método Del Picnómetro. | PDF», Scribd. Accedido: 6 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/156997096/INV-E-707-07-Gravedad-especifica-de-los-materiales-asfalticos-solidos-y-semisolidos-Metodo-del-picnometro>
- [46] G. Prats, *Microbiología Clínica*. Ed. Médica Panamericana, 2006.
- [47] V. Gochev, Z. Velkova, y M. Stoytcheva, «Hexavalent chromium removal by waste mycelium of *Aspergillus awamori*», *J. Serbian Chem. Soc.*, vol. 75, n.º 4, pp. 551-564, 2010, doi: 10.2298/JSC090331008G.
- [48] K. Gáplovská *et al.*, «Study of the binding sites in the biomass of *Aspergillus niger* wild-type strains by FTIR spectroscopy», *Chem. Pap.*, vol. 72, n.º 9, pp. 2283-2288, sep. 2018, doi: 10.1007/s11696-018-0487-6.
- [49] G. Socrates, *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies: Tables and Charts*. John Wiley & Sons, 2004.
- [50] R. de J. Torres Gómez, «Recuperación de metales del grupo del platino por métodos hidrometalúrgicos». Accedido: 29 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.24275/uami.79407x16z>
- [51] Bahobil, A., R. Bayoumi, H. Atta y M. El-Sehrawey, «Fungal biosorption for cadmium and mercury heavy metal ions isolated from some polluted localities in KSA.», vol. *Int. J. Curr. Microbiol.App.Sci.*, 6(6) vols., pp. 2138-2154.
- [52] J. Suriya, S. Bharathiraja, y R. Rajasekaran, «Biosorption of heavy metals by biomass of *Enterobacter cloacae* isolated from metal-polluted soils.», *Int. J. ChemTech Res.*, vol. 5, n.º 3, pp. 1229-1238, 2013.
- [53] J.-G. Carriazo, M. Uribe-Pérez, y O. Hernández-Fandiñom, «Diagramas de predominancia, de Frost y de Pourbaix: tres contextos para desarrollar competencias en procesos de óxido-reducción», *Sci. Tech.*, vol. XIII, n.º 34, pp. 569-574, 2007.
- [54] M. R. Fagundes-Klen, P. Ferri, T. D. Martins, C. R. G. Tavares, y E. A. Silva, «Equilibrium study of the binary mixture of cadmium–zinc ions biosorption by the *Sargassum filipendula* species using adsorption isotherms models and neural network», *Biochem. Eng. J.*, vol. 34, n.º 2, pp. 136-146, may 2007, doi: 10.1016/j.bej.2006.11.023.
- [55] M. V. Tran, T. T. Doan, P. N. Duong, M. L. P. Le, y T. P. T. Nguyen, «Electrochemical Behavior and Morphology of Nano Catalyst for Fuel Cell: The effect of Ultrasonic and

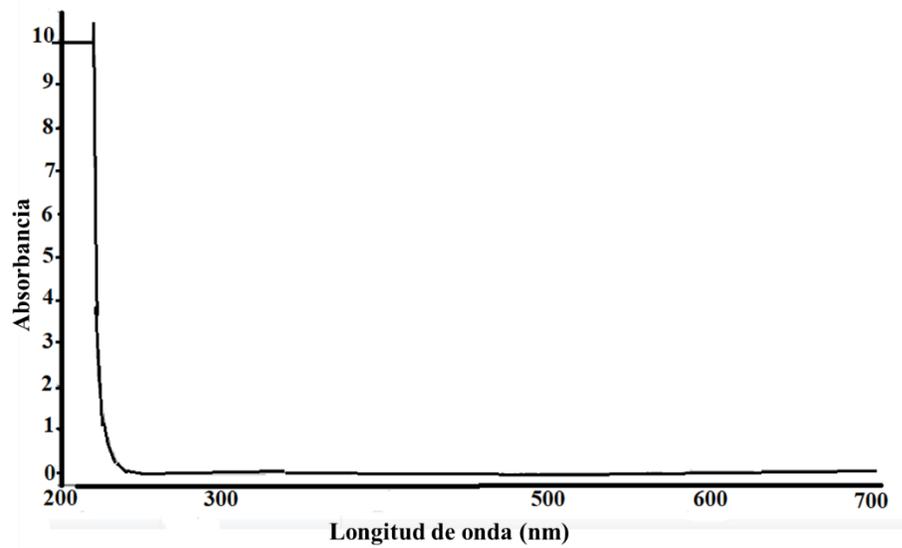
- Microwave Techniques», *ECS Trans.*, vol. 50, n.º 2, pp. 2001-2008, mar. 2013, doi: 10.1149/05002.2001ecst.
- [56] M. Georgieva y B. Andonovski, «Determination of platinum(IV) by UV spectrophotometry», *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 375, n.º 6, pp. 836-839, mar. 2003, doi: 10.1007/s00216-003-1783-7.
- [57] J. Z. Chan, R. Rasit Ali, K. Shameli, M. S. N. Salleh, K. X. Lee, y E. D. Mohamed Isa, «Green Synthesis of Gold Nanoparticles using Aqueous Extract of Clitoria Ternatea Flower», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 808, n.º 1, p. 012036, mar. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/808/1/012036.
- [58] Z. Liang *et al.*, «The effect of pH value on the formation of gold nanoshells», *J. Nanoparticle Res.*, vol. 13, n.º 8, pp. 3301-3311, ago. 2011, doi: 10.1007/s11051-011-0244-z.
- [59] R. de J. Torres Gómez, «Recuperación de metales del grupo del platino por métodos hidrometalúrgicos». Accedido: 22 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.24275/uami.79407x16z>

ANEXO A●

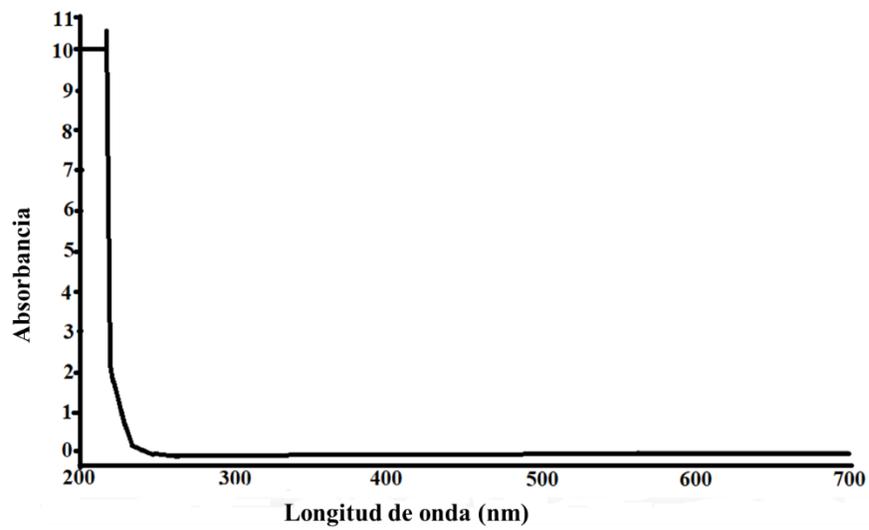
Espectro UV-vis de Al.



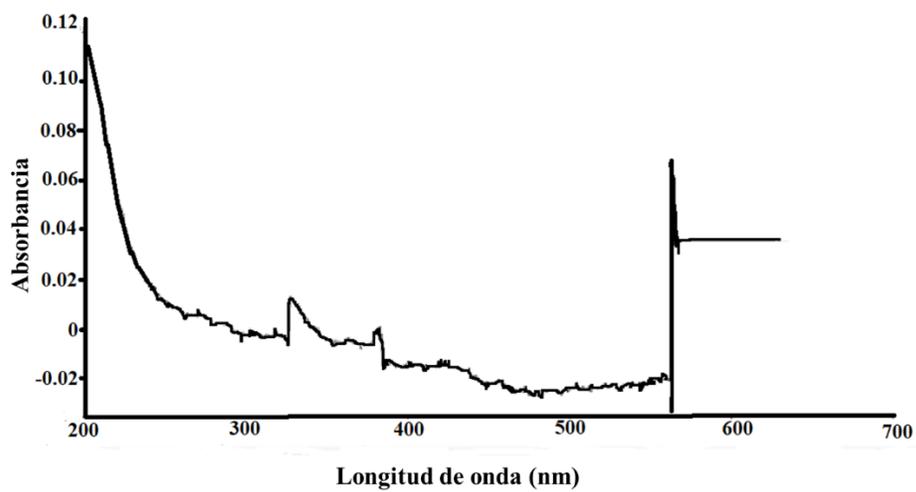
Espectro UV-vis de Ca.



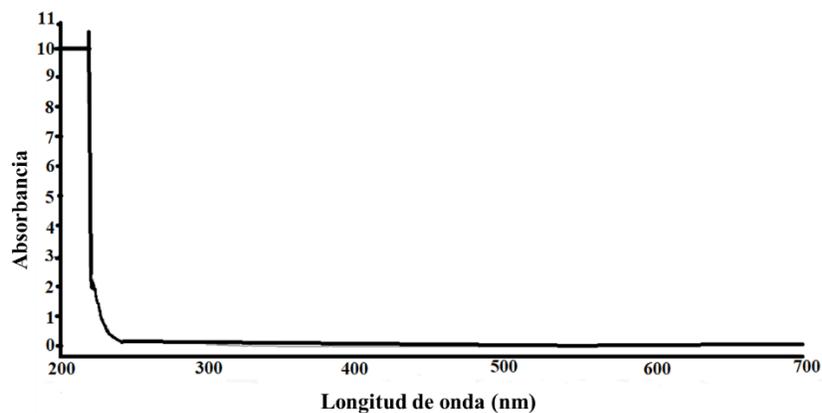
Espectro UV-vis de Cu.



Espectro UV-vis de Fe.

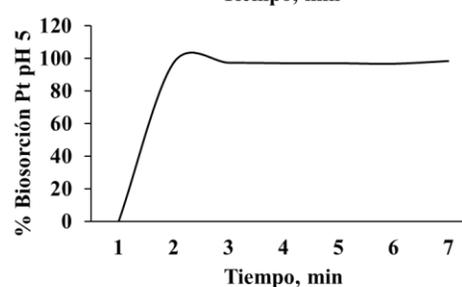
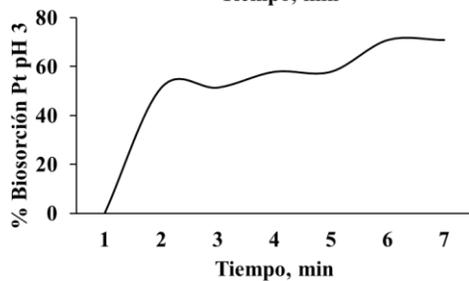
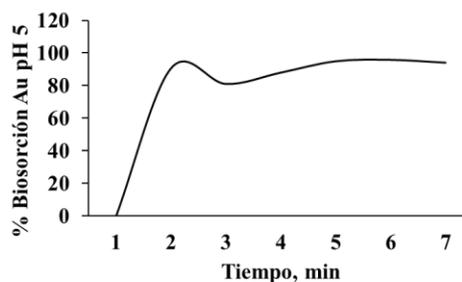
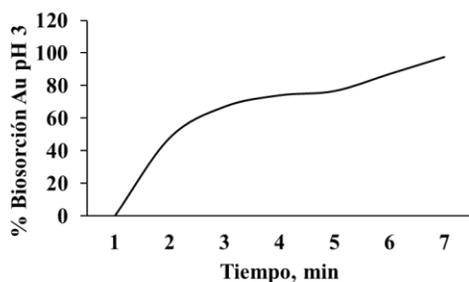


Espectro UV-vis de Ti.

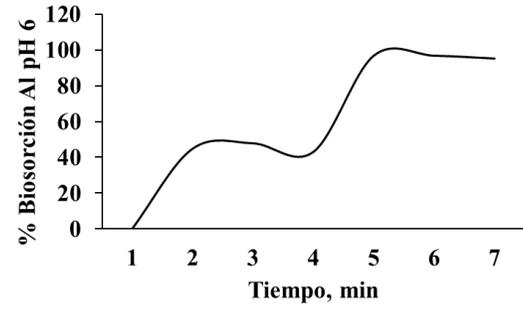
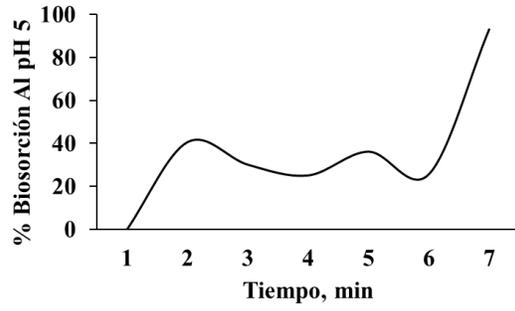
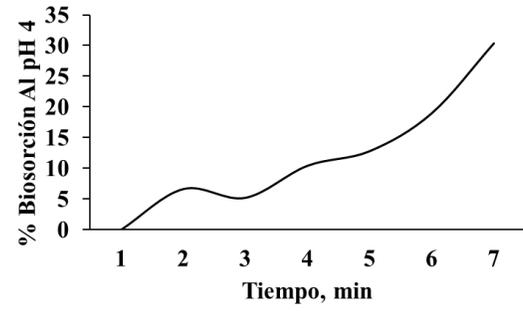
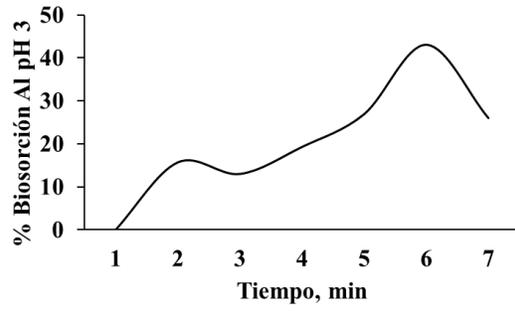


ANEXO B.

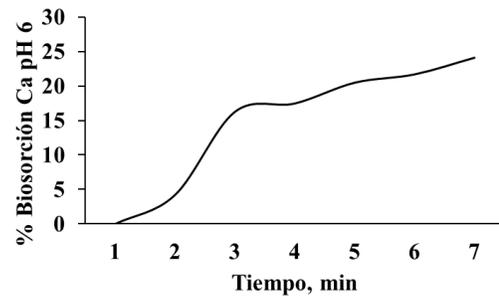
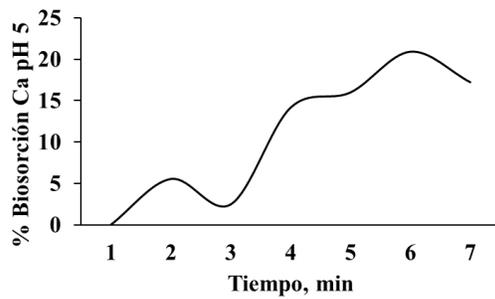
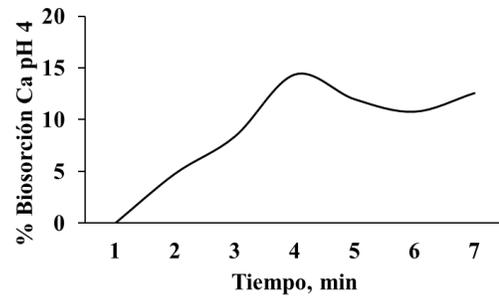
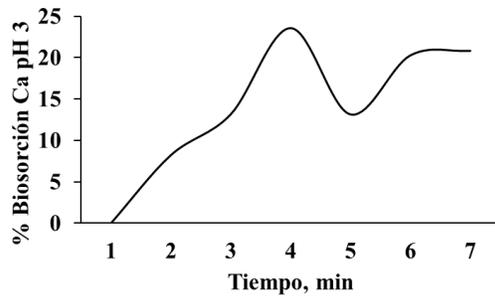
Representación gráfica de la cinética de biosorción de oro y platino a pH 3 y 5.



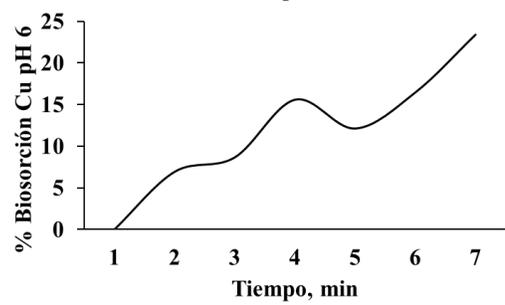
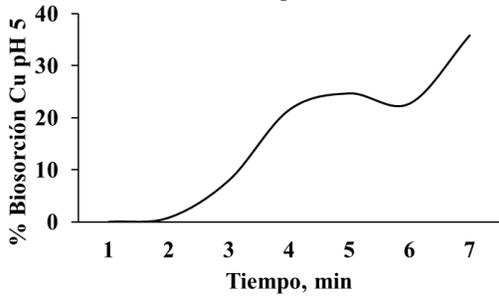
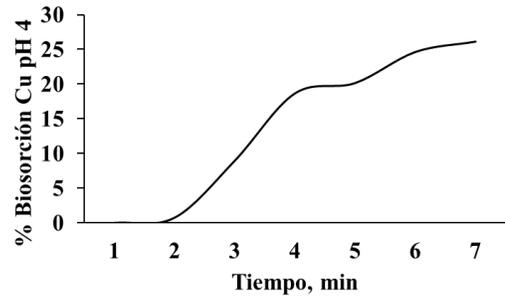
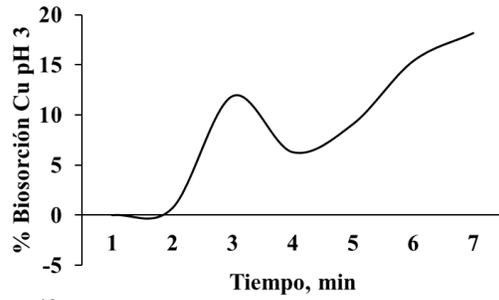
Representación gráfica de la cinética de biosorción de aluminio a pH 3, 4 5 y 6.



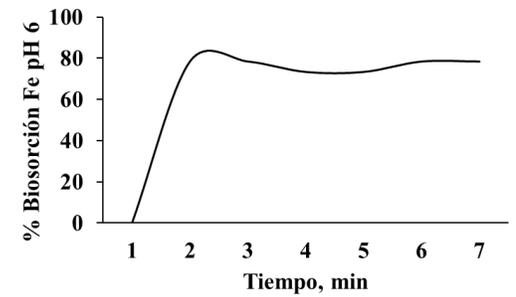
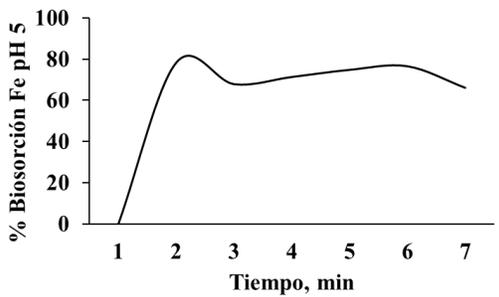
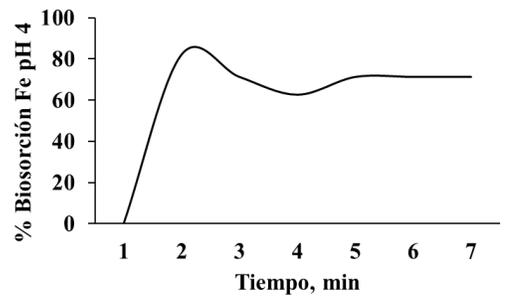
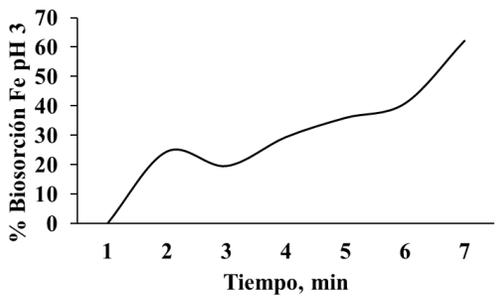
Representación gráfica de la cinética de biosorción de calcio a pH 3, 4 5 y 6.



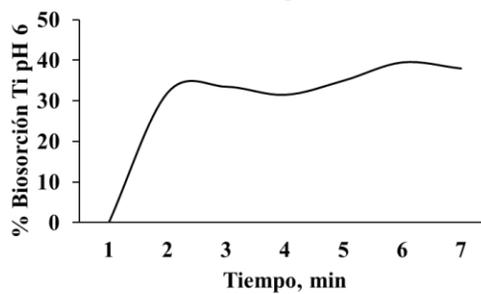
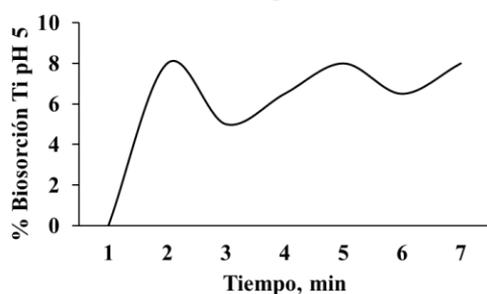
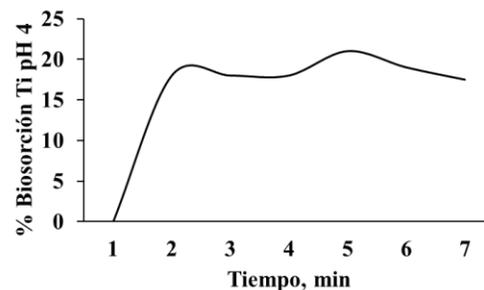
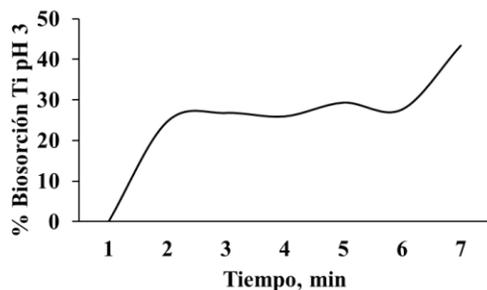
Representación gráfica de la cinética de biosorción de cobre a pH 3, 4 5 y 6.



Representación gráfica de la cinética de biosorción de hierro a pH 3, 4 5 y 6.



Representación gráfica de la cinética de biosorción de titanio a pH 3, 4 5 y 6.



ANEXO C.

ALUMINIO

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para aluminio a pH 2.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	2.25	5.3	472.1
20	2.32	5.1	477.6
40	2.2	5	466.8
60	2.3	4.7	477.2
90	2.27	3.8	481.2
120	2.31	3.6	497.8

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para aluminio a pH 3.



Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	4.55	0.9	416.5
20	4.99	0.9	405.1
40	4.99	0.9	417.9
60	4.68	0.9	432.5
90	4.85	0.9	435.6
120	4.66	0.9	429.5

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para aluminio a pH 4.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	3.69	1.3	461.3
20	3.67	1	440.1
40	3.71	1.3	465.2
60	3.69	1.1	441.4
90	3.54	1.3	447.7
120	3.53	1.2	450.8

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para aluminio a pH 5.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	4.55	0.9	416.5
20	4.99	0.9	405.1
40	4.99	0.9	417.9
60	4.68	0.9	432.5
90	4.85	0.9	435.6
120	4.66	0.9	429.5

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para aluminio a pH 6.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	5.94	0.9	404.3
20	4.63	0.9	400.3
40	5.36	0.9	420.5
60	5.22	0.8	429
90	5.13	0.8	417
120	5.51	0.9	420.9

CALCIO

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para calcio a pH 2.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	2.23	5.6	512.1
20	2.23	5	491.5
40	2.2	4.9	485.5
60	2.2	4.8	472.3
90	2.3	4.6	477
120	2.2	4.5	486.4

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para calcio a pH 3.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	3.16	1.4	440.7
20	3.17	1	453.8
40	3.17	1	453.2
60	3.23	1	446.7

90	3.28	1	442.8
120	3.29	0.9	445.1

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para calcio a pH

4.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	3.96	0.8	423
20	3.93	0.8	415.5
40	3.97	0.8	421.7
60	3.95	0.8	423.2
90	3.93	0.8	431.3
120	3.97	0.8	437.6

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para calcio a pH

5.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	4.69	1.1	398.5
20	4.53	1.1	393.1
40	4.53	1.1	393.2
60	4.46	1	389.6
90	4.53	1	411.6
120	4.52	1	416

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para calcio a pH 6.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	4.96	1.1	355.8
20	4.35	1	372.1
40	4.35	1	371.2
60	4.25	1	373.3
90	4.21	1	381.8
120	4.2	1	381.5

COBRE

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para cobre a pH 2.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	2.33	5.3	553.3
20	2.25	5.9	482.9
40	2.25	5.4	480.1
60	2.28	5.4	483
90	2.3	4.7	493.5
120	2.37	4.2	479.3

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para cobre a pH 3.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	3.11	0.9	495.9
20	3.11	1	479.4
40	3.16	0.9	492.4
60	3.16	0.9	462.7

90	3.16	0.9	498.3
120	3.19	0.8	486.4

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para cobre a pH

4.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	3.79	0.8	478.8
20	3.81	0.7	467.1
40	3.8	0.9	464.7
60	3.8	0.9	476.1
90	3.82	0.7	486.7
120	3.77	0.8	410.8

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para cobre a pH

5.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	3.9	0.9	475.5
20	3.83	0.8	483.2
40	3.87	0.7	486.8
60	3.84	0.8	475.1
90	3.83	0.8	480.3
120	3.92	0.7	473.3

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para cobre a pH

6.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	4	0.9	479.7

20	3.84	0.8	478.2
40	3.95	0.8	474.9
60	3.89	0.9	478.5
90	3.9	0.7	469.9
120	3.91	0.6	462.3

HIERRO

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para hierro a pH

2.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	2.25	5.5	638.2
20	2.2	5.4	601
40	2.3	5.2	584.9
60	2.27	4.8	567.8
90	2.26	4.7	539.4
120	2.34	4.6	530.4

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para hierro a pH

3.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	3.04	1	571.2
20	3.09	0.9	513.6
40	3.11	0.9	482.2
60	3.12	0.8	472.9
90	3.11	0.8	473
120	3.17	0.8	476.6

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para hierro a pH 4.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	4.18	0.8	520.1
20	4.1	0.8	463.1
40	4.08	0.8	444.9
60	4.13	0.8	427.8
90	4.23	0.8	417.4
120	4.28	0.8	434.1

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para hierro a pH 5.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	4.62	0.9	517.4
20	4.65	0.8	468
40	4.6	0.9	457.3
60	4.56	0.9	442.4
90	4.53	0.9	418.7
120	4.58	0.7	417.5

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para hierro a pH 6.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	4.79	0.7	466.3
20	4.48	0.7	443.6
40	4.62	0.7	431
60	4.61	0.7	439.1

90	4.58	0.7	422.5
120	4.6	0.7	419.5

TITANIO

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para titanio a pH 2.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	2.27	5.2	573.7
20	2.38	4.7	523.9
40	2.38	4.6	492.7
60	2.4	4.3	479.1
90	2.33	3.9	474.9
120	2.38	3.7	482.4

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para titanio a pH 3.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	3.21	0.8	527.8
20	3.22	0.8	495.7
40	3.22	0.8	486.4
60	3.26	0.7	466.8
90	3.27	0.7	462.7
120	3.38	0.7	479.8

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para titanio a pH 4.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	4.09	0.8	497.2
20	4.12	0.8	484
40	4.22	0.8	472.3
60	4.14	0.8	471.3
90	4.2	0.8	424.1
120	4.17	0.8	448.2

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para titanio a pH 5.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	4.55	0.8	484
20	4.54	0.8	426.7
40	4.53	0.8	442.1
60	4.48	0.8	434.1
90	4.47	0.8	452.4
120	4.38	0.8	443.5

Variaciones de pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción (ORP) para titanio a pH 6.

Tiempo	pH	Conductividad	ORP
1	5.3	0.8	520.7
20	4.77	0.8	520.7
40	4.88	0.8	446.6
60	4.77	0.8	442

90	4.95	0.8	474.8
120	4.44	0.8	435



Gabriela Elizabeth Tapia Quiro Gabriela Elizabeth T...

MECANISMO DE BIOSORCIÓN DE ORO Y PLATINO EN SOLUCIONES ACUOSAS MEDIANTE BIOMASA MUERTA DE AS...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:429814204

Fecha de entrega

13 feb 2025, 8:16 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

13 feb 2025, 8:20 a.m. GMT-6

Nombre de archivo

MECANISMO DE BIOSORCIÓN DE ORO Y PLATINO EN SOLUCIONES ACUOSAS MEDIANTE BIOMAS....pdf

Tamaño de archivo

4.4 MB

106 Páginas

22,284 Palabras

117,927 Caracteres

25% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 24%  Fuentes de Internet
- 13%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Instituto de investigación en metalurgia y materiales	
Título del trabajo	MECANISMO DE BIOSORCIÓN DE ORO Y PLATINO EN SOLUCIONES ACUOSAS MEDIANTE BIOMASA MUERTA DE <i>ASPERGILLUS NIGER</i>	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	M.C.Gabriela Elizabeth Tapia Quiroz	0618387a@umich.mx
Director	Dr. Ramiro Escudero García	ramiro.escudero @umich.mx
Codirector	Dr. Raúl Cortés Martínez	raul.cortes @umich.mx
Coordinador del programa	Dr. Alberto Ruíz Marines	alberto.ruiz@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Gabriela Elizabeth Tapia Quiroz 
Lugar y fecha	12 de febrero de 2025, Morelia, Michoacán.