



**UNIVERSIDAD DEL MAR**

Campus Puerto Ángel

**EFFECTO DE LA RELACIÓN Mg:P PARA RECUPERAR NITRÓGENO  
EN FORMA DE ESTRUVITA A PARTIR DE ORINA HUMANA  
TRATADA EN UN BIORREACTOR LFI**

**TESIS**

Que para obtener el Título Profesional de  
**Ingeniero Ambiental**

Presenta

**Lizzeth Jazmín Del Valle Medina**

Directora de Tesis

**M.C. Belem Espinosa Chávez**

Puerto Ángel, Oaxaca, Agosto 2017

## RESUMEN

La separación de efluentes domésticos trae consigo diversas ventajas como la disminución del consumo de agua en los inodoros y el aprovechamiento de residuos para la recuperación de nutrientes, tal es el caso de la orina de la cual puede aprovecharse principalmente nitrógeno a partir de la hidrólisis de la urea. Este trabajo consistió en operar un biorreactor de lecho fluidizado inverso para evaluar el proceso de ureólisis con orina humana concentrada y diluida, con tiempo de reacción de 7 h y posteriormente recuperar nitrógeno en forma de estruvita evaluando diferentes relaciones molares  $Mg^{2+}:PO_4^{3-}$ . El biorreactor mostró buen desempeño logrando eficiencias de ureólisis de 94.3 y 85.7% respectivamente. La biomasa inmovilizada en el soporte fue capaz de soportar altas concentraciones de urea (20677.4 mg/L) y de  $N-NH_4^+$  (10798.3 mg/L). Para recuperar el  $N-NH_4^+$  de la orina hidrolizada se evaluaron diferentes relaciones molares  $Mg^{2+}:PO_4^{3-}$  (1.0:1.0, 1.5:1.0, 2.0:1.0), se encontró que con orina concentrada se logró recuperar 2228.9 mg/L de  $N-NH_4^+$  con una relación molar de 2.0:1.0 recuperando la mayor cantidad estruvita (104.5 g) mientras que con orina diluida se logró recuperar 665 mg/L de  $N-NH_4^+$  con la relación molar 1.5:1.0 y 19.3 g de estruvita. Durante la adición de sales de magnesio y fosfato, la orina concentrada hidrolizada tuvo menor disminución de pH ( $>8$ ) que la orina diluida hidrolizada ( $<7$ ), por lo que presentó las mejores condiciones para favorecer la precipitación de estruvita.

Palabras clave: orina humana, biorreactor LFI, ureólisis, amonio, estruvita.

Esta tesis fue elaborada en los laboratorios de la Universidad del Mar, campus Puerto Ángel, bajo la dirección de la M.C. Belem Espinosa Chávez y la asesoría de la Dra. Susana García Ortega.

El trabajo experimental fue financiado por el proyecto titulado “Obtención de estruvita a partir del tratamiento biológico de aguas amarillas en un reactor LFI” con clave de unidad programática 2IE1603.

## DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada principalmente a mi madre por todo su esfuerzo para salir adelante, a Raúl y a mi hermano por las acciones que realizaron para que pudiera llegar al lugar donde estoy ya que gracias a ellos pude concluir satisfactoriamente mis estudios, porque siempre estuvieron para apoyarme en todo momento. Gracias a mi cuñada Zulma, a mi sobrino Adrián y a mi familia Medina Delgado por todo el amor y apoyo incondicional que siempre me han brindado.

*“Esa es nuestra mejor y más acertada respuesta, la humildad. Sin ella perderíamos todo el sentido, el misterio se nos escaparía y proseguiríamos sordos y ciegos, ignorantes como monos”. Stephen King*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco principalmente a mi directora de tesis M.C. Belem Espinosa Chávez y a la Dra. Susana García Ortega por brindarme su apoyo incondicional durante la elaboración de esta tesis en el ámbito académico y personal, estoy agradecida infinitamente porque me ayudaron a crecer como persona, pues siempre estuvieron para apoyarme en lo que necesitaba y me brindaron su amistad. Gracias por todo el conocimiento, los consejos y las experiencias compartidas y principalmente por permitirme aprender de mis errores.

Gracias a la Dra. Susana García Ortega, Dr. Aitor Aizpuru, Dr. Carlos Estrada y Dra. Florina Ramírez Vives por dedicarle el tiempo necesario para mejorar este documento.

A los donadores de orina que sin ellos no hubiera sido posible la realización de esta tesis.

Le doy gracias a mis amigos y compañeros que compartieron experiencias conmigo durante mi estancia en la Umar principalmente a Evaristo, Mariano, Pablo, Diana, Jaz, Clara, Nere, Dani, Caro, a Vicente gracias por ser un buen compañero a pesar de las malas bromas, a Jared y Mayra también por aguantarme y al resto de mis compañeros de grupo: Anyeli, Ángel y Juan Manuel, por ser un grupo tan excepcional. Gracias a los profesores por todas las herramientas que nos enseñaron. Gracias al profesor Antonio López, Jorge Castro y a todas aquellas personas que siempre me brindaron opiniones positivas y que me brindaron su amistad ante cualquier situación.

Gracias al Programa Nacional de Becas 2016 de la SEP por el apoyo otorgado para la titulación.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	ii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE CUADROS .....	xi
NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES.....	xii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Separación desde el origen .....	1
1.1.1 Aguas grises.....	2
1.1.2 Aguas negras .....	3
1.1.2.1 Aguas cafés.....	3
1.1.2.2 Aguas amarillas.....	3
1.2 Orina humana .....	4
1.3 Recuperación de nutrientes de la orina.....	5
1.3.1 Almacenamiento.....	6
1.3.2 Reducción de volumen por evaporación .....	6
1.3.3 Congelamiento parcial.....	6
1.3.4 Osmosis inversa .....	7
1.3.5 Intercambio iónico .....	7
1.3.6 Precipitación de estruvita .....	7
1.4 Hidrólisis de urea .....	8
1.5 Reactor de lecho fluidizado inverso .....	9
2. ANTECEDENTES .....	12
2.1 Recuperación de nutrientes en aguas residuales .....	12

2.2 Recuperación de nutrientes de orina humana .....	14
3. JUSTIFICACIÓN .....	17
4. HIPÓTESIS .....	18
5. OBJETIVOS .....	18
5.1 Objetivo general.....	18
5.2 Objetivos específicos .....	18
6. MATERIALES Y MÉTODOS .....	19
6.1 Medio de cultivo .....	19
6.1.1 Orina concentrada .....	19
6.1.2 Orina diluida .....	19
6.2 Configuración y operación del biorreactor de lecho fluidizado inverso LFI20	
6.2.1 Inóculo.....	20
6.2.2 Determinación de biomasa inmovilizada en el soporte.....	21
6.2.2.1 Determinación de sólidos volátiles inmovilizados (SVI) .....	21
6.2.2.2 Determinación de proteína.....	22
6.2.3. Actividad ureolítica específica .....	22
6.3 Configuración y operación del reactor químico para la recuperación de	
nitrógeno.....	23
6.4 Cinéticas de recuperación de nitrógeno a partir de orina hidrolizada .....	25
6.5 Técnicas analíticas .....	25
6.5.1 pH.....	25
6.5.2 Determinación de amoníaco.....	26
6.5.3 Determinación de urea .....	26
6.5.4 Determinación de fosfatos.....	27
6.5.5 Determinación de Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	27

6.5.6 Determinación de sulfatos .....	28
6.5.7 Determinación de magnesio .....	28
6.6 Caracterización de precipitados .....	29
6.7 Análisis estadístico .....	29
7. RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	30
7.1 Evaluación del desempeño del biorreactor LFI alimentado con orina concentrada y orina diluida .....	30
7.1.1 Biomasa Inmovilizada (BI) y Actividad Ureolítica Específica (AUE) ...	38
7.2. Cinéticas de recuperación de nitrógeno a partir de orina hidrolizada .....	40
7.2.1 Orina concentrada hidrolizada (OCH) .....	40
7.2.2 Orina diluida hidrolizada (ODH) .....	46
7.3 Sólidos precipitados .....	50
7.3.1 Biorreactor LFI .....	50
7.3.2 Recuperación de nitrógeno en OCH .....	52
7.3.3 Recuperación de nitrógeno en ODH .....	56
7.3.4 Recuperación de nitrógeno en los sólidos recuperados en OCH y ODH .....	59
8. CONCLUSIONES .....	61
9. RECOMENDACIONES .....	62
10. LITERATURA CITADA .....	63
11. ANEXOS .....	70
Anexo 1 .....	70



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipo de efluentes domésticos generados en el hogar. ....	2
Figura 2. Principales nutrientes en aguas: grises, negras y amarillas .....	4
Figura 3. Reactor de lecho fluidizado inverso.....	11
Figura 4. Representación esquemática del acoplamiento de la reacción biológica y química para la recuperación de estruvita a partir de orina humana.	24
Figura 5. Variabilidad del pH en el biorreactor LFI alimentado con orina concentrada (0-30 d) y orina diluida (31-58 d).....	31
Figura 6. Eficiencia de ureólisis en el biorreactor LFI con orina concentrada y orina diluida. ....	34
Figura 7. Velocidad de ureólisis en el biorreactor LFI con OC y OD. ....	35
Figura 8. Velocidad de producción de $\text{N-NH}_4^+$ en el biorreactor LFI con OC y OD .....	36
Figura 9. Eficiencias de remoción de $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ y DQO en el biorreactor LFI con orina concentrada y orina diluida. ....	37
Figura 10. Evolución de pH (a), concentración de $\text{N-NH}_4^+$ (b) y concentración de $\text{P-PO}_4^{3-}$ (c) con diferente relación molar $\text{Mg}^{2+}:\text{PO}_4^{3-}$ en la recuperación de nitrógeno a partir de OCH. $n=3$ para cada relación molar. ....	42
Figura 11. Efecto de la relación molar $\text{Mg}^{2+}:\text{PO}_4^{3-}$ en la recuperación de $\text{P-PO}_4^{3-}$ y $\text{Mg}^{2+}$ en OCH.....	43
Figura 12. Efecto de la relación molar en la remoción de urea, DQO, y $\text{SO}_4^{2-}$ en OCH.....	45
Figura 13. Evolución de pH (a), concentración de $\text{N-NH}_4^+$ (b) y concentración de $\text{P-PO}_4^{3-}$ (c) con diferente relación molar $\text{Mg}^{2+}:\text{PO}_4^{3-}$ en la recuperación de nitrógeno a partir de ODH, $n=3$ para cada relación molar. ....	47
Figura 14. Efecto de la relación molar $\text{Mg}^{2+}:\text{PO}_4^{3-}$ en la recuperación de $\text{PO}_4^{3-}$ y $\text{Mg}^{2+}$ en ODH. ....	48
Figura 15. Efecto de la relación molar en la remoción de urea y $\text{SO}_4^{2-}$ en ODH.	50
Figura 16. Sólidos recuperados después de la ureólisis en a) OC y b) OD en el recirculador-sedimentador. ....	51

Figura 17. Morfología de los cristales de estruvita recuperado en el biorreactor LFI en a) OCH y b) ODH.....	51
Figura 18. Sólido recuperado durante las cinéticas de recuperación de nitrógeno en el reactor químico con OCH.....	52
Figura 19. Morfología de los cristales de estruvita en las cinéticas de recuperación de nitrógeno con OCH con relación molar $Mg^{2+}:PO_4^{3-}$ a) 1.0:1.0, b) 1.5:1.0 y c) 2.0:1.0.....	55
Figura 20. Sólido recuperado durante las cinéticas de recuperación de nitrógeno en el reactor químico con ODH.....	56
Figura 21. Morfología de los cristales de los precipitados recuperados en las cinéticas de recuperación de nitrógeno con ODH con relación molar $Mg^{2+}:PO_4^{3-}$ a) 1.0:1.0, b) 1.5:1.0 y c) 2.0:1.0.....	59

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición del agua de la red de suministro, n=3. ....	31
Cuadro 2. Valores promedio de los principales componentes de OC y OD a la entrada y salida del biorreactor LFI. ....	33
Cuadro 3. Actividad ureolítica específica y concentración de biomasa en el soporte en cada etapa de operación del biorreactor LFI. ....	39
Cuadro 4. Diferentes concentraciones de biomasa encontradas en biorreactores LFI. ....	39
Cuadro 5. Concentraciones de los componentes en el afluente y efluente del reactor químico alimentado con OCH, operado de manera continua. n=3. ....	44
Cuadro 6. Concentraciones de los componentes en el afluente y efluente del reactor químico con ODH. ....	49
Cuadro 7. Nitrógeno en el precipitado recuperado en OCH. ....	53
Cuadro 8. Relación molar $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$ real en el afluente del reactor químico y del precipitado de las cinéticas de recuperación de nitrógeno con OCH.....	54
Cuadro 9. Nitrógeno en el precipitado recuperado en ODH. ....	57
Cuadro 10. Relación molar $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$ real en el afluente del reactor químico y del precipitado de las cinéticas de recuperación de nitrógeno con ODH.....	58

## NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES

<b>AUE:</b>	Actividad ureolítica específica (g N-NH <sub>3</sub> /g SVI·h)
<b>DQO:</b>	Demanda química de oxígeno (mg/L)
<b>BI:</b>	Biomasa inmovilizada
<b>LFI:</b>	Lecho fluidizado inverso
<b>n:</b>	número de muestras analizadas
<b>ND:</b>	No detectable
<b>OC:</b>	Mezcla de orina concentrada
<b>OCH:</b>	Orina concentrada hidrolizada
<b>OD:</b>	Mezcla de orina diluida 16 veces con agua de la red de suministro
<b>ODH:</b>	Orina diluida hidrolizada
<b>PBD:</b>	Polietileno de baja densidad
<b>r<sub>u</sub>:</b>	Velocidad de ureólisis (hidrólisis de urea por microorganismos) en mg de urea/L·h
<b>r<sub>p</sub>:</b>	Velocidad de producción de nitrógeno como ion amonio (N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) en mg/L·h
<b>SSV:</b>	Sólidos suspendidos volátiles (g/L)
<b>SVI:</b>	Sólidos volátiles inmovilizados (kg/m <sup>3</sup> soporte seco)
<b>TR:</b>	Tiempo de reacción (h)
<b>UASB:</b>	Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Reactor de lecho anaerobio de flujo ascendente)