



Compostaje de los biosólidos que se generan en la planta de
tratamiento de aguas residuales de una industria láctea
(SIP: 20120951)



M. Guadalupe Vicencio de la Rosa

Roberto Valencia Vázquez

Margarita Araceli Ortega Chávez

IPN CIIDIR DURANGO

02/02/2013

Índice

RESUMEN.....	4
INTRODUCCIÓN.....	4
METODOLOGIA.....	5
<i>Cuantificación de los residuos</i>	5
<i>Caracterización química de los residuos y aditivos</i>	6
<i>Establecimiento de las pilas de compostaje</i>	7
<i>Monitoreo del proceso</i>	8
<i>Calidad química del compost</i>	8
<i>Costo del manejo de los residuos</i>	8
<i>Temperatura</i>	9
<i>Degradación de la materia orgánica</i>	9
<i>pH y CE</i>	11
<i>Madurez</i>	11
<i>Calidad química del compost</i>	12
<i>Costo del manejo de los residuos</i>	13
CONCLUSIONES.....	14
REFERENCIAS	14

Figuras

Fig. 1. Incremento de temperatura en las pilas durante el compostaje.	9
Fig. 2. a) Cinética de remoción y b) velocidad de degradación de materia orgánica durante el compostaje de los residuos sólidos de la PTAR.	10
Fig. 3. a) Cinética de remoción y b) velocidad de degradación de grasa durante el compostaje de los residuos sólidos de la PTAR.	10
Fig. 4. Comportamiento del pH (-♦-) y de la CE (-■-) durante el compostaje de los residuos sólidos.	11

Cuadros

Cuadro I. Cantidad de sólidos flotantes separados en la PTAR.	6
Cuadro II. Evaluación química de los sólidos removidos de la PTAR y aditivos.	6
Cuadro III. Porcentajes de los constituyentes de los residuos en base a los *ST.	7
Cuadro IV. Aporte de nutrientes de cada uno de los residuos que componen la mezcla.	7
Cuadro V. Índice de germinación de diversos cultivos en extractos del compost.	12
Cuadro VI. Calidad química del compost de los residuos generados en la PTAR.	12
Cuadro VII. Costo de insumos y de operación en la estabilización de los residuos PTAR.	13

RESUMEN

Los residuos sólidos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales de una quesería al degradarse producen compuestos volátiles con olor putrefacto que atraen moscas y roedores, y lixiviados que contaminaban el suelo, para cumplir con la NOM-004-SEMARNAT-2004 se estabilizaron por compostaje. Los residuos fueron cuantificados y caracterizados químicamente, junto con el corrector de humedad (recortes de pasto) y el inóculo (estiércol de vaca); y posteriormente en la empresa se estableció su compostaje en pilas aireadas por volteo, 0.57 ton de residuos (9.2% de grasa, 3.4% de nitrógeno y 85% de humedad) fueron mezclados con 1.1 ton de pasto, 1.2 ton de estiércol y 3.1 m³ de agua tratada, mezcla que fue dividida en 3 pilas de 1.5 ton. Durante el compostaje de los residuos se midió temperatura, humedad, pH y conductividad eléctrica (CE), y se cuantificó la materia orgánica (MO), grasa y madurez con el índice de germinación. Al final se evaluó la calidad química del compost. Los resultados mostraron que la MO de los residuos se estabilizó en 18 semanas con una reducción del 43 % y una remoción del 95% de grasa, cuya degradación fue más lenta (-0.097 semanas⁻¹) que cuando se llevó a menor escala (-0.49 semanas⁻¹). El compost producido presentó una calidad química buena, 35.5 % de MO, 1.5 de nitrógeno, 0.5% de fósforo y 3.6% de potasio, valores que se encuentran dentro de lo reportado por la NTEA-006-SMA-RS-2006 y OMS (1995), con un pH de 9.6 y una CE de 4.7 mS.cm⁻¹ que no afectó el índice de germinación de semillas de diversos cultivos agrícolas. La estabilización de los residuos por ésta técnica tuvo un costo de \$ 2700 (\$ 1.9 por kg de compost), inversión que se puede recuperar con la venta del producto.

Palabras claves: grasa, degradación, compost.

INTRODUCCIÓN

Durante el tratamiento de las aguas residuales de la Quesería Holanda se generan diversos residuos sólidos flotantes; los del desnatador-sedimentador se envían al basurero municipal y los del tanque anaerobio y de la laguna de estabilización son dispuestos en un espacio abierto a un extremo de la planta, junto con los sólidos sedimentables del filtro. Sólidos que al degradarse producen compuestos volátiles malolientes que atraen fauna nociva y lixiviados que se infiltran a través del suelo, contaminándolo.

Con el fin de resolver la disposición final los residuos sólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la quesería, aprovecharlos y proteger el ambiente se propuso en éste trabajo estabilizarlos por compostaje y cumplir así la NOM-004-SEMARNAT 2002 que establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en residuos sólidos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

De ésta forma la materia orgánica se mantiene dentro del ciclo natural, sin necesidad de disponerla en el relleno sanitario y de esta forma la empresa podrá certificarse como una industria de producción más limpia. Además el compost puede ser usado para mejorar el suelo de la cortina de árboles de la empresa y el resto venderlo.

Para lograr el objetivo, en las instalaciones de la Quesería se estableció el sistema de compostaje de pilas aireadas, utilizando como corrector de humedad residuos de jardinería y para acelerar el proceso se utilizó estiércol de ganado vacuno.

METODOLOGIA

En primera instancia se llevó a cabo la cuantificación de los residuos y su caracterización física y química. Posteriormente se mezclaron con residuos de jardinería y estiércol de ganado vacuno para obtener una relación C/N de 15, y una humedad del 65%.

Cuantificación de los residuos

La cantidad de residuos sólidos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se calculó en base a volumen y densidad. El volumen se obtuvo al multiplicar el área ocupada por la capa superficial de sólidos flotantes en cada una de las unidades de tratamiento: Desnatador-Sesidentador (DS), Tanque Anaerobio (TA) y Laguna de Estabilización (LE), por el grosor de dichas capas; y la densidad de los sólidos se determinó por el método de la probeta, midiendo volumen y peso de los residuo. Finalmente la masa (kg) de los residuos se calculó al multiplicar la densidad de los residuos por su volumen. En el cuadro I se muestran la cantidad de sólidos generados por semana.

Es importante mencionar que en el tanque anaerobio se acumularon en 2.5 años 16351.4 kg de sólidos flotantes, con 87.2% de humedad y 9% de grasa, unidad que fue clausurada del tren de tratamiento por ineficiente.

Cuadro I. Cantidad de sólidos flotantes separados en la PTAR.

	Residuos	Sólidos	Agua	grasa
	kg/semana			
DS	379.6	59.22	320.41	45.6
TA	120.9	15.4	105.4	10.5
LE	506.5	81.5	424.9	2.9
Total	1007	156.1	850.7	59

DS= Desnatador-sedimentador, TA=Tanque anaerobio y LE= Laguna de estabilización.

Caracterización química de los residuos y aditivos

A los residuos sólidos de la PTAR, pasto y estiércol de vaca se les determinó: humedad (NOM-021-SEMARNAT-2000); potasio (K) y fósforo (P) totales, previa calcinación y digestión ácida, el K se cuantificó por absorción atómica y el P por el método de Olsen, nitrógeno total microKjeldahl (Etchevers, 1992), potencial de hidrógeno (pH), materia orgánica (MO) y carbón orgánico (COT) de acuerdo a Zhu, *et al.* (2004) y Haug, (1993) y grasa por el método Soxhlet (NOM-138-SEMARNAT-2003). El resultado de la caracterización química de los residuos se resume en el Cuadro II.

Cuadro II. Evaluación química de los sólidos flotantes removidos de la PTAR y aditivos.

Sólidos	Humedad	MO	Grasa	N	P	K
	%					
DS	83.9±0.6	15.3±0.5	11.7±0.6	0.4±0.02	0.03±0.001	0.05±0.001
TA	85.5±2.8	13.4±2.6	9.0±1.9	0.4±0.1	0.04±0.001	0.02±0.001
LE	84.4±1.2	12.4±1.0	0.4±0.02	0.4±0.02	0.16±0.001	0.06±0.001
Pasto	10.1±1.0	48.3±1.4	0.78±0.1	3.7±0.05	0.15±0.001	1.40±0.001
Estiércol	14.4 ±0.7	62.5±0.7	0.15±0.001	1.5±0.03	0.64±0.001	0.57±0.001

DS= Desnatador-sedimentador, TA=Tanque anaerobio y LE= Laguna de estabilización.

Los residuos sólidos removidos de la PTAR llevan una gran cantidad de agua, de 84 a 87 % de humedad, por lo que se adicionó un corrector de humedad para su compostaje, recortes de pasto de la empresa. Además por su contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio (**Cuadro II**) son fácilmente degradados por los microorganismos descomponedores,

no obstante para reducir el tiempo de compostaje y eliminar el mal olor que se genera durante su degradación, se adicionó estiércol de ganado vacuno, abundante en la región.

Establecimiento de las pilas de compostaje

Los valores de carbono, nitrógeno, fósforo, potasio y grasa de los residuos sólidos se transformaron a base seca (Cuadro III), para calcular el aporte nutrimental de cada residuo en la mezcla (Tchobanoglous, *et al.*, 1993).

Cuadro III. Porcentajes de los constituyentes de los residuos en base a *ST

	DS	TA	LE	Pasto	Estiércol
*ST	16.0±0.7	14.4±2.9	15.5±1.2	89.9±1.0	85.5 ±0.9
SV	94.7±0.4	92.8±2.6	79.4±0.5	87.1±2.6	62.5±0.7
Grasa	77.0±0.2	67.3±2.1	3.6±0.4	2.4±0.2	0.15±0.00
C	52.63±0.24	51.57±0.05	44.1±0.28	49.2 ±0.09	34.7±0.4
N	2.8±0.03	3.3±0.04	3.9±0.05	3.7±0.06	1.52±0.03
P	0.21±0.01	0.24±0.004	1.04±0.03	0.41±0.02	0.64±0.001
K	0.3±0.003	0.02±0.001	0.06±0.001	3.8±0.02	0.57±0.001

DS= Desnatador-sedimentador, TA=Tanque anaerobio y LE= Laguna de estabilización.

La mezcla estuvo constituida por 572 kg de residuos sólidos de la PTAR, 1125 kg de recortes de pasto y 1200 kg de estiércol de ganado vacuno (Cuadro IV), con una relación C/N de 15, C/P de 81.2, C/K de 20 y humedad de 26.9%, la cual se incrementó a 65% con la adición de 3 m³ de agua tratada de la PTAR.

Cuadro IV. Aporte de nutrientes de cada uno de los residuos que componen la mezcla

Nutrientes	Pasto	Estiércol	DS	TA	LE	Total
	kg					
agua	113.1	174.0	85.9	390.9	15.9	779.8
Materia seca	1011.9	1026.0	18.4	57.4	3.1	2116.7
Grasa	23.3	1.54	14.1	38.6	0.1	78.7
Carbono	488.9	356.1	9.7	29.8	1.4	885.8
Nitrógeno	37.4	18.7	0.5	1.9	0.1	58.7
Fósforo	4.1	6.6	0.0	0.1	0.0	10.9
Potasio	38.0	5.9	0.1	0.1	0.0	44.0
kg residuos	1125.0	1200.0	104.3	448.3	19.0	2896.5

Monitoreo del proceso

Durante el compostaje de los residuos la humedad en las pilas se verifico con la prueba de puño, adicionando agua cuando fu necesario, cada 10 días se midió la temperatura en las pila con un termómetro de aguja y se airearon, mezclando con una horquilla o trascabo. La temperatura ambiente se midió con un termómetro de bulbo.

Cuando la temperatura de la pila se iguala con la temperatura ambiente se considera que el proceso ha terminado (3 meses aproximadamente) y posteriormente se deja de uno a dos meses para que el compost madure.

La reducción de la materia orgánica (MO) durante el proceso se midió cada 4 semanas así como el pH, la conductividad eléctrica (CE) y la grasa, por los métodos mencionados en la caracterización de los residuos; la CE se midió de acuerdo a Etchevers (1992).

La madures del compost se determinó con el índice de germinación (IG) a las 13 y 18 semanas de proceso, para lo cual se pusieron a germinar semillas de chile (*Capsicum annuum*), frijol (*Phaseolus vulgaris L*), maíz (*Zea mays*) y lechuga (*Lactuca sativa L*) en extractos acuosos del compost (1:10) e incubadas a 20° C por 5 días (Tiqia y Tam, 1993).

Calidad química del compost

Al compost maduro se le determino N_{TK} ; fósforo disponible (Pd), y potasio disponible (Kd) de acuerdo a Etchever (1992) y NOM-021-SEMARNAT 2000 y materia orgánica, carbón orgánico total y pH de acuerdo a (Haug, (1993) y Zhu *et al.* (2004).

Costo del manejo de los residuos

Se estimó considerando costos de: acarreo del estiércol (un flete), corte de pasto (mano de obra y gasolina para la podadora), 2 obreros para la construcción de las pilas y renta de un trascabo, un obrero una vez por semana para voltear y adición agua a las pilas, el costo del agua tratada y 27 m² de plástico de silo para cubrir las pilas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del compostaje de los residuos sólidos de la PTAR se describen a continuación.

Temperatura

El monitoreo de la temperatura indicó que en el primer mes la temperatura ascendió hasta 45 °C con un punto de inflexión, debido probablemente a las heladas tardías que se presentan en el mes de abril (Fig. 1). No obstante, a ésta temperatura los microorganismos fecales procedentes del tracto digestivo de vacas no sobreviven más de un mes (Vicencio, 2011), lo cual se verificó en el compost.

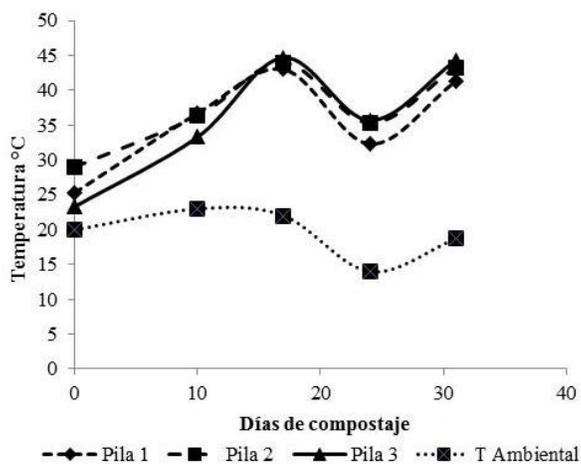


Fig. 1. Incremento de temperatura en las pilas durante el compostaje.

Degradación de la materia orgánica

En las primeras 4 semanas de compostaje, la materia orgánica se redujo un 28% (Fig. 2 a), después se fue degradando lentamente a una velocidad de -0.035 semanas⁻¹ (Fig. 2 b), y a partir de la semana 15 los cambios cuantitativos en ella fueron mínimos; habiendo una reducción total del 43 %.

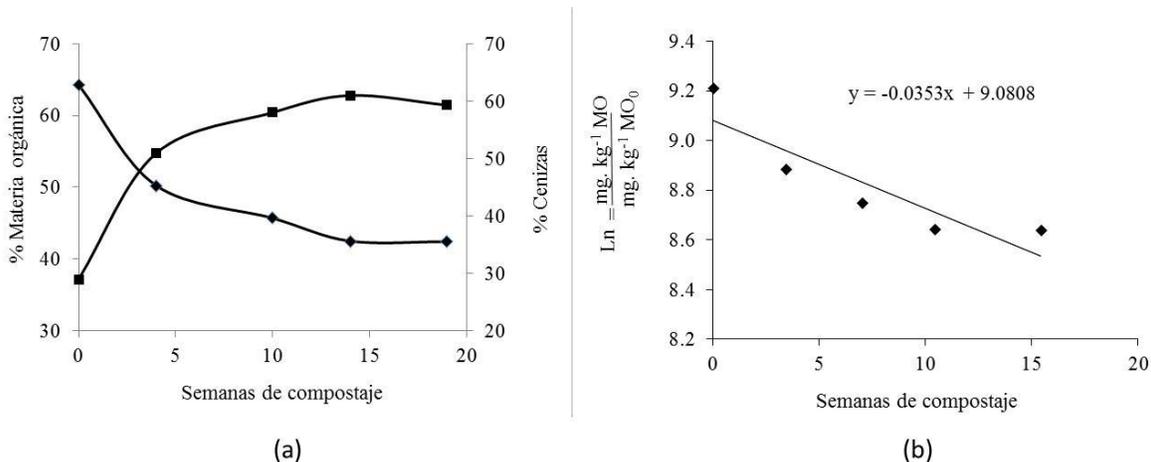


Fig. 2. a) Cinética de remoción y b) velocidad de degradación de materia orgánica durante el compostaje de los residuos sólidos de la PTAR.

En cuanto a la degradación de la grasa, en las primeras 7 semanas de compostaje se removió un 70% de ésta a una velocidad de $-0.097 \text{ semanas}^{-1}$ (Fig. 3 a, b), menor a la obtenida en un trabajo previo con sólidos sedimentables de la PTAR con paja y estiércol, donde la reducción fue del 89% a una velocidad de $0.49 \text{ semanas}^{-1}$ (Ramírez, 2011), diferencias que se atribuyen a la cantidad de residuos que se manejaron, 1500 kg de la mezcla de residuos trabajada contra 40 kg de la mezcla de sólidos sedimentables, donde probablemente la aireación al mezclar no fue homogénea.

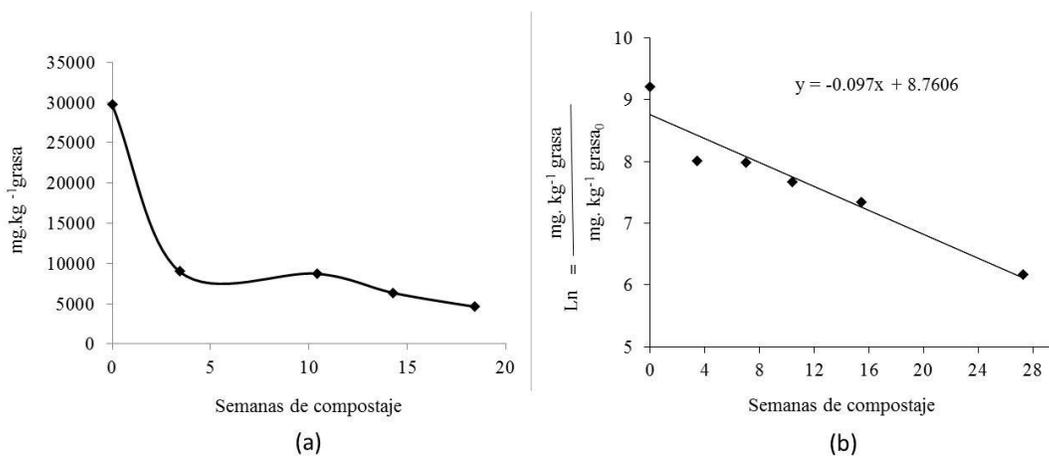


Fig. 3. a) Cinética de remoción y b) velocidad de degradación de grasa durante el compostaje de los residuos sólidos de la PTAR.

pH y CE

El pH durante el compostaje se incrementó de 8.9 a 9.6 (Fig. 4), lo cual se pudo deber a la cantidad de estiércol que se utilizó, otros autores reportan un pH cercano a 7 en compost de estiércol de ganado bovino (Zhu, *et al.*, 2004). Con respecto a la conductividad eléctrica, el compost presentó un valor de $5.1 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Fig. 4), debido a la gran cantidad de sales que aporta el estiércol al mineralizarse, sumadas a las del agua tratada que se utilizó.

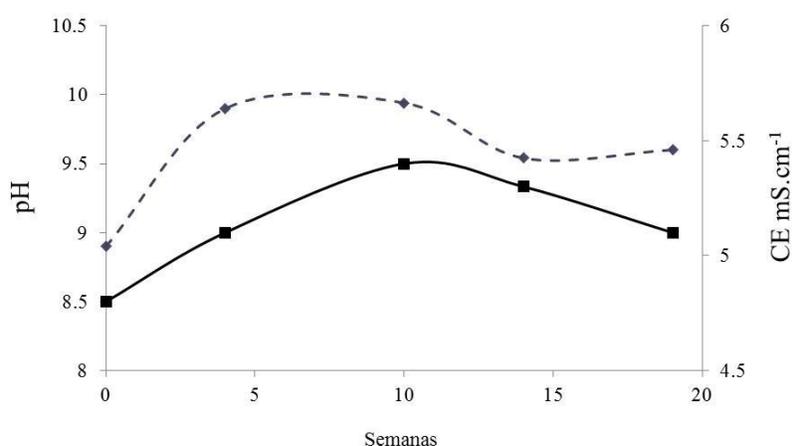


Fig. 4. Comportamiento del pH (-♦-) y de la CE (-■-) durante el compostaje de los residuos sólidos.

Madurez

Al término del compostaje de los residuos se realizaron pruebas de toxicidad con semillas de diversos cultivos agrícolas para estimar el tiempo aproximado de maduración. En la semana 13 de proceso, sólo el índice de germinación (IG) del frijol era mayor del 90 y en el cultivo más sensible, lechuga, apenas de 62 (Cuadro VI), por lo que se dejó madurar el compost un mes. En la semana 18 se encontró que el IG para la lechuga y el maíz era de 108 y 126, lo que indicó que el compost había madurado; también el compost de los sólidos sedimentables y del filtro de paja de la PTAR de la quesería, alcanzó su madurez en la semana 18 (Ramírez, 2011).

Un IG mayor de 100 se debe a que los nutrientes del compost estimularon el crecimiento de la raíz de las plántulas con respecto a las plántulas testigo que germinaron en agua. Cabe

mencionar que el pH y la salinidad del compost no repercutieron en el índice IG del frijol, maíz y lechuga.

Cuadro V. Índice de germinación de diversos cultivos en extractos del compost.

Cultivo	13	18
	Semanas	
Chile	85 ± 22	ND
Fríjol	110 ± 28	124 ± 11
Maíz	87 ± 15	126 ± 14
Lechuga	62 ± 6	108 ± 21

ND= no determinada

Calidad química del compost

Los resultados de la calidad química del compost muestran que está dentro de lo reportado por la USEPA (1993) y OMS (1995) en MO (35.5 %), nitrógeno (1.5 %) y fósforo (0.5%), ver cuadro VI; la cantidad de potasio ésta por arriba de lo reportado por la Norma Técnica Estatal del Estado de México (NTEA-006-SMA-RS-2006) y OMS (1995), lo cual se debe probablemente a que se utilizó agua tratada en el proceso de compostaje.

Cuadro VI. Calidad química del compost de los residuos generados en la PTAR.

Parámetros	Compost	NTEA-006-SMA-RS-2006	OMS (1985)	USEPA (1993)
Materia orgánica	35.5 ± 5.7	> 15	25 - 50	17.1 - 63.5
% NTK	1.5 ± 0.1	-	0.4 - 3.5	0.67 - 2.44
% F _D	0.48 ± 0.02	> 0.10	0.3 - 3.5	0.40 - 4.12
% K _D	3.6 ± 0.8	> 0.25	0.5 - 1.8	-
C/N	12.9	< 12	14 - 20	8 - 40
pH	9.6 ± 0.1	6.5 - 8	6 - 9	-
ρ gcm ⁻¹	0.8551 ± 0.08	-	-	-
CE mS.cm ⁻¹	4.7 ± 0.3	-	-	-

El pH del compost, está por arriba de lo reportado por la Organización Mundial de la Salud (1985) y de la NTEA-006-SMA-RS-2006, ver Cuadro IV, no obstante el pH de los compost depende de los residuos de partida, por ejemplo el compost de bagazo de hojas de orégano y estiércol de vaca (1:1) reportaron un pH de 8.8 (Corral, 2011) y en compost de estiércol

de cerdo con paja de arroz un pH de 8 (Zhu *et al.*, 2004); otros autores han encontrado que cuando hay una sobre mineralización del nitrógeno durante el proceso se generan ácidos que disminuyen el pH del compost (Sánchez-Monedero *et al.*, 2001), al respecto Vicencio, *et al.* (2011) reportaron un pH de 5.5 en compost de lodos residuales de una PTAR de un rastro debido a una sobre mineralización.

En cuanto a la densidad, es un parámetro que indica de manera indirecta el contenido de materia orgánica; 35.5 % en el compost producido y una densidad de 0.8551 g/cm³. Probablemente por la relación de ambos parámetros, no sea considerada por la NTEA-006-SMA-RS-2006, USEPA (1993) y OMS (1995).

Costo del manejo de los residuos

En la estimación del costo de estabilización de los residuos de la PTARP se tomó en cuenta la mano de obra de 4 h/semana para el volteo de las pilas (15 veces), de un día para la remoción de los sólidos de la planta y otro día para la poda del pasto; la renta del trascabo con operador y diésel y el costo de un flete para el acarreo del estiércol. En el cuadro VII se muestran los resultados.

Cuadro VII. Costo de insumos y de operación en la estabilización de los residuos PTAR.

Actividades		Costo unitario	Costo total
		(\$)	(\$)
Mano de obra/día	Remoción de sólidos	200	200
	Poda de pasto	200	200
	Volteo de pilas (15 veces/4 h)	100	1500
Un flete	Acarreo del estiércol	400	400
Renta de trascabo/h	Operación	300	300
Agua (7 m³)	Riego	7	49
Plástico de silo (3 x 9)	Cubrir pilas	14	126
Total			2775
1.4 Ton de compost		\$ 1.92/kg	

Donde la estabilización de los residuos de la PTAR tuvo un costo de \$2775.00 (M/N), el cual se puede recuperar si el compost (1450 kg) se pone a la venta, \$ 1.9 / kg, costo que puede competir con el de otros compost que se venden en los centros comerciales de la ciudad de Durango, cuyos precios van de \$ 4 a \$15, e inclusive con la tierra para maceta que venden en los viveros (\$ 2.8/kg). Con la producción de compost durante todo el año se puede reducir el costo.

CONCLUSIONES

Los residuos sólidos removidos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la quesería se estabilizaron por compostaje en 18 semanas con un costo de \$2775.00 (M/N). Inversión se podría recuperar si el compost se pone a la venta.

El compost presenta una calidad química aceptable de acuerdo a la NTEA-006-SMA-RS-2006, USEPA (1993) y la OMS (1995)

La empresa en lo futuro podrá manejar los residuos sólidos de la PTAR de esta forma y certificarse como una industria de producción más limpia, al cerrar el ciclo del manejo de sus residuos con el compostaje.

REFERENCIAS

1. Corral T. L. C. 2011. Aprovechamiento de los residuos que se generan en la extracción del aceite esencial de orégano (*Lippia graveolens* hbk. s.l.). Tesis de la Maestría en Ciencias en Gestión Ambiental, IPN CIIDIR Durango. 88 pp.
2. Etchevers B. J. D. 1992. *Manual de métodos para análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes*. Colegio de Posgraduados en Ciencias Agrícolas, Montecillos Estado de México. 130 pp.
3. Haug R.T. 1993. *The practical handbook of compost engineering*. Lewis Publishers, USA. 717 pp.
4. Norma Técnica Estatal Ambiental. 2006. NTEA-006-SMA-RS-2006. Que establece los requisitos para la producción de los mejoradores de suelos elaborados a partir de residuos orgánicos.
http://qacontent.edomex.gob.mx/sma/empresas_instituciones/normativida_materia_ambiental/residuos_solidos/groups/public/documents/edomex_archivo/sma_pdf_ntea_006_sma_rs_2006.pdf. Consultada el 13 de agosto de 2012.

5. Organización Mundial de la Salud. 1985. Manual para elaborar compost: bases conceptuales y procedimientos. Ginebra, Suiza. <http://www.Organizaci%C3%B3n+Mundial+de+la+Salud.+1985%2C+Manual+para+la+elaboraci%C3%B3n+de+compost%3A+bases+conceptuales+y+procedimientos>. Consultada el 13 de agosto de 2012.
6. Ramírez R. E. S. 2011. Evaluación del proceso de compostaje de residuos con alto contenido de grasa láctea y estimación del costo-beneficio de su producción. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Química del Instituto Tecnológico de Durango. 120 p.
7. SEMARNAT. 2000. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelo. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación, 31 de diciembre de 2002.
8. Tchobanoglous G., H. Theisen y S. A. Vigil. 1993. *Integrated Solid Waste Management: Engineering principles and management issues*. McGraw-Hill, International Editions. Singapur. 978 pp.
9. Tiquia S. M. & F. Y. Tam. 1993. Elimination of phytotoxicity during co-composting of spent pig-manure sawdust litter and pig sludge. *Bioresource Technology*, 65: 43-49.
10. USEPA. 1993. United States Environmental Protection Agency. Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge. Federal Regulations, part 503 biosolids rule, 58(32): 9248-9415. Washington, D.C. USA.
11. Vicencio-de la Rosa M. G., Pérez-López M. E., Medina-Herrera E y Martínez-Prado M. A. 2011. Producción de composta y vermicomposta a partir de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de un rastro. *Rev. Int. de Contam. Ambie* 27 (3): 263-270.
12. Zhu N., CH. Deni, Y. Xiong and H. Quian. 2004. Performance characteristic of tree aeration system in the swine manure composting. *Bioresource Technology*. 95, 319-326.