PRIMARIOS DE LA CIUDAD DE MAR DEL PLATA

Elisabet Peralta, Roberto González, Gabriela von Haeften, Ana Paula Comino, Gustavo Gayoso, Sergio Vergara, Gastón Genga y Marcelo Scagliola

Obras Sanitarias Mar del Plata. Brandsen 6650. Mar del Plata, Argentina. gambiental@osmgp.gov.ar

Resumen Mar del Plata es una ciudad costera de la República Argentina de 590.000 habitantes, ubicada al sudeste de la Provincia de Buenos Aires. La ciudad posee un sistema de alcantarillado que permite la recolección conjunta de los efluentes cloacales e industriales. El tratamiento de los efluentes consiste en separación de sólidos mediante cribas y deshidratación de los barros retenidos por compactación, generando 20-25 toneladas diarias de barros primarios que son transportados a un vivero, donde se estiba durante dos años. Se estudió el compostaje en hileras con volteos como alternativa de gestión del barro cloacal, evaluando el proceso con dos relaciones entre el soporte (chipeado de poda) y el barro (1:1 y 0,5:1) durante el verano de 2001. Ambas relaciones pueden aplicarse para cumplir con los requerimientos de reducción de patógenos de las normativas. A mayor proporción de soporte fue menor la generación de lixiviados, el tiempo de tratamiento y el riesgo de recontaminación. Las concentraciones de metales pesados en barros y lixiviados fueron bajas. Se encontró que un porcentaje de reducción de materia orgánica > 40% fue el mejor indicador de madurez. Experiencias de invierno mostraron que solo la relación 1:1 fue adecuada para asegurar reducción de patógenos.

Introducción

Mar del Plata es una ciudad costera de la República Argentina de 590.000 habitantes (MPGP, 2001), ubicada al sudeste de la Provincia de Buenos Aires. La ciudad posee un sistema de alcantarillado que permite la recolección conjunta de los efluentes cloacales e industriales. Este consta de redes cloacales y cuatro colectoras máximas que transportan los efluentes del 85,2 % de la ciudad a la Planta de Pretratamiento "Ingeniero Baltar" ubicada 10 km al norte del centro de la ciudad. El pretratamiento consiste en separación de sólidos mediante cribas de 0,5 mm y deshidratación de los barros retenidos por compactación, generando 20-25 toneladas diarias de barros primarios que son transportados a un vivero, distante

aproximadamente 40 km, para su estabilización anaeróbica natural. Las características de los barros se detallan en la Tabla 1. Es de destacar que las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (metales pesados o PTEs), se encuentran por debajo de los límites establecidos en las normativas internacionales y nacionales (ver Capítulos 2 y 4).

En estos últimos años la gestión sustentable de los residuos ha adquirido una destacada importancia a escala mundial en general y nacional en particular. Por esta razón, la Empresa Municipal Obras Sanitarias Mar del Plata (OSSE), ha decidido optimizar el tratamiento de los barros cloacales, planteando la necesidad de efectuar un análisis técnico-económico y ambiental de distintas tecnologías de tratamiento para seleccionar la alternativa más adecuada a la realidad local. Actualmente, el tiempo de estibado anaeróbico de los barros es de aproximadamente 2 años, obteniéndose una enmienda orgánica de uso exclusivamente forestal. La planta de estibado y la zona cercana son monitoreadas desde el año 2003 mediante un programa anual de control, que permite evaluar una posible afectación del medio natural. Dicho programa incluye determinaciones analíticas físico-químicas y de metales pesados, tanto en el agua subterránea (aguas arriba y abajo) como en los suelos (en distintos puntos y profundidades). Estos últimos estudios son tercerizados al Laboratorio de Suelos del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Delegación Balcarce. La evaluación de los resultados obtenidos hasta la fecha permiten observar el comportamiento del sistema y de esta forma poder concluir que existe un bajo grado de afectación ambiental en la zona.

En una etapa preliminar de optimización de la situación existente, se analizaron tres tecnologías: lombricultura (Scagliola, 1998), inertizado y compostaje. Los resultados comparativos de las tres tecnologías (Peralta, 1998), considerando los aspectos técnico-económico y ambiental, indicaron en primera instancia, al compostaje como el sistema de tratamiento más apropiado. El compostaje es considerado una tecnología ambientalmente "sana" (EST o Environmental Sound Technology), por cuanto minimiza los riesgos hacia la salud (pública y ambiental) y la utilización de fertilizantes químicos en la agricultura. Se decidió analizar con mayor profundidad la aplicación del compostaje como tecnología alternativa de tratamiento de los barros. La planificación del proyecto consistió, en primera instancia, en realizar una etapa experimental mediante una prueba piloto a escala real en diferentes condiciones climáticas (verano e invierno). La descripción completa y detallada de la misma se

encuentra en un artículo ya publicado (Peralta et al., 2002-2003), y en el presente Capítulo se realizará un resumen. En el país no se conocían antecedentes previos sobre el compostaje de barros primarios; es por ello que estas pruebas aportaron una experiencia inédita de aplicación de esta tecnología para estos residuos, la cual está basada en el desarrollo que para el tratamiento de barros secundarios ha implementado la ciudad de San Carlos de Bariloche (Laos et al., 2000).

El compostaje es un proceso aeróbico controlado, que acelera la degradación natural de la materia orgánica de un residuo, transformándolo en un producto suficientemente inocuo y estable para ser empleado como acondicionador de suelos. El sistema de compostaje consiste en mezclar un sustrato con un soporte (aserrín, viruta, material de poda, etc.) y puede efectuarse de dos maneras:

- a) abierto : pilas estáticas o hileras con volteos
- b) cerrado: cuando el proceso se realiza en un reactor

Durante el proceso, se observan diferentes etapas de actividad microbiana y temperaturas asociadas (ver Capítulo 1) y al final del mismo, se evalúan estabilidad y madurez utilizando diversas combinaciones de indicadores (ver Capítulo 2). Los tiempos del proceso de compostaje varían dependiendo del sistema empleado. El producto obtenido, compost, es un acondicionador de suelos de acuerdo con lo establecido en las guías y normativas de referencia. La presencia de PTEs y su calidad microbiológica, han sido originalmente las principales limitaciones reguladas para el uso de los compost (Council Directive, 1986; USEPA, 1993) (ver Capítulo 2). Éstos pueden ser de varios tipos, entre otros: agrícola-ganadero, forestal, recuperación de suelos degradados o restauración del paisaje. Si bien al respecto no se cuenta en Argentina con una legislación de aplicación, en el presente trabajo se toman como referencias una resolución del Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente (MDSyMA, 2001) y las normativas internacionales.

Resumen de la experiencia piloto

Objetivos

Los objetivos fueron: (a) evaluar a escala piloto la factibilidad de compostaje de estos residuos, (b) caracterizar la calidad química y microbiológica del sólido a tratar, del producto final y de los lixiviados generados durante el tratamiento y (c) obtener parámetros de diseño para un tratamiento a escala real.

Metodología operativa

En el presente trabajo se describe la prueba piloto de verano y un resumen de algunos resultados de la prueba de invierno. La prueba de verano se inició a principios de febrero del 2001 en una parcela cedida por el propietario del vivero en el cual se vienen disponiendo los barros como ya se ha mencionado (planta de estibado). Se empleó el tipo de compostaje en hileras con volteos mecánicos, sobre plataformas impermeables de hormigón de sección cuadrada (6 m), las cuales poseían su correspondiente sistema de recolección de lixiviados (se incluyó una plataforma y tanque control). El soporte utilizado consistió en el chipeado de la poda de los árboles existentes en el vivero, mientras que el sustrato fueron los barros crudos de un día de extracción de la Planta de Pretratamiento. Con el fin de realizar comparaciones de eficiencia y comportamiento, sobre cada plataforma (4 en total) se colocó una hilera de 10 m³ mezclando barros y poda chipeada en distintas proporciones en volumen: hileras 1 y 2, partes iguales (1:1); hilera 3, dos partes de barros y una de soporte (0,5:1) y la hilera 4, barros solos. El tamaño aproximado de cada hilera fue de 1,30 m de altura, 2,80 m de ancho y 5 m de largo. La hilera 2 fue volteada diariamente y las restantes a demanda del requerimiento de reducción de patógenos (5 volteos, USEPA, 1993).

El seguimiento y evaluación de la experiencia se realizó mediante un Programa de Monitoreo Analítico y de Controles de Proceso (Tabla 2, Fotos 1 y 2).

Controles diarios del proceso:

- condiciones climáticas: temperatura ambiente, orientación del viento y cantidad de lluvias caídas.
- temperatura: la medición se realizó en cuatro puntos de la hilera, excluyendo los extremos y a dos profundidades (20 cm y 60 cm). Los resultados de estos cuatro puntos y para cada profundidad se promediaron y de estos dos datos finales se adoptó el mayor. Los días de volteo, la medición se realizó después del mismo.
- volúmenes de lixiviado y de lluvias: las plataformas fueron construidas de forma tal de permitir la recolección por separado de estos líquidos, dado que cada hilera ocupaba la mitad de las mismas manteniendo el otro lateral libre.
- volumen ocupado por la hilera: con la finalidad de facilitar los cálculos se asemejó la configuración de la hilera a la de un trapecio triangular, midiendo largo, ancho y altura de la misma.
- volteos: se efectuaron 5 volteos durante la etapa termofílica con excepción de la hilera 2 (volteos diarios), empleando una pala frontal.

- olores: como la percepción humana de olores es muy subjetiva se adoptó una metodología para evaluarlos asignando una escala propia de niveles de intensidad; ésta consistió en orden creciente: no perceptible (0), perceptible (1), poco molesto (2), molesto (3), muy molesto (4) y agresivo (5).
- atracción de vectores (especialmente moscas y mosquitos): en forma similar al ítem anterior se asignó una escala arbitraria consistente en: pocas (+), algunas (++) y bastantes (+++).
- <u>Tamizado del compost curado (o maduro)</u>: mediante zarandeo mecánico (tamiz de 0,5 cm) se obtuvo el producto y se recuperó el chip para un posible reuso.
- Metodología analítica: Las técnicas analíticas empleadas en barros y lixiviados son descriptas en la publicación previa de este trabajo (Peralta et al., 2002-2003)

Resultados del proceso de compostaje

El compostaje de barros con alto contenido orgánico, incluye una etapa termofílica caracterizada por temperaturas elevadas (responsables de la reducción de patógenos), que ocurren como consecuencia de la gran liberación de calor producida por una intensa degradación de compuestos orgánicos del barro, como consecuencia de la digestión bacteriana aeróbica. Consecuentemente, y para que este proceso ocurra, se requiere de suficiente cantidad de materia orgánica biodegradable, gran densidad de bacterias facultadas para desarrollar metabolismo aeróbico, oxígeno suficiente para sostener estos procesos respiratorios y agua en el sistema (humedad) que favorezca la colonización bacteriana de todo el material, la disolución de fracciones solubles y la absorción del calor liberado por las reacciones químicas de degradación, con el consecuente aumento de temperatura de todo el sistema.

El detalle descripto muestra la interdependencia de distintas variables que dan lugar a la etapa termofílica, sin embargo, los procesos explicados son asimismo responsables de la estabilización del material y la madurez del producto final. Conforme avanza el tratamiento, las bacterias degradan materia orgánica bajando su concentración; puede deducirse, por lo tanto, que el cambio de una de las variables alterará el proceso, es así como la disminución de materia orgánica es seguida por la atenuación de todo el proceso, con disminución de la densidad bacteriana y consecuente disminución de la temperatura. Finalmente, el barro inicial se transforma en un producto estabilizado y maduro.

Etapa Mesofílica inicial

Durante esta etapa y la etapa termofílica de reducción de patógenos, la temperatura ambiente promedio al momento de medir fue de 27°C y se registraron 5 días de lluvia, incluyendo una precipitación de 70 mm en un lapso de tres horas aproximadamente. Bajo estas condiciones climáticas, la duración de esta etapa hasta alcanzar los 55°C requeridos para la etapa de reducción de patógenos fue: hilera 1 y 2 solo un día, hilera 3: 2 días e hilera 4: 7 días (Fig. 1). Como se puede observar, se mantuvo una relación inversamente proporcional a la cantidad de soporte. El nivel de olores en todas las hileras en el primer día fue de 5, el máximo de la escala. Luego disminuyó proporcionalmente a mayor cantidad de chipeado; la hilera 4 (barro solo) fue la de mayor generación de olores.

Etapa de reducción de patógenos

Dentro de la etapa termofílica que se produce a temperaturas > 40-45°C, las normas requieren para reducción de patógenos temperaturas ≥ 55°C durante 3 días en pilas estáticas ó 15 días con un mínimo de 5 volteos en pilas con volteos (USEPA, 1993). La Tabla 3 presenta el período de duración de esta etapa de reducción de patógenos para cada hilera ensayada y el comportamiento de distintos parámetros del proceso. La emanación de olores de las hileras se incrementó al momento de los volteos, alcanzando la máxima intensidad durante el primer volteo de la hilera 4, donde se percibió a una distancia de 15 metros. El análisis de atracción de vectores incluyó la presencia de gusanos tanto en las hileras como en los lixiviados. Como se observa en la Fig. 1, las temperaturas bajaron como consecuencia de los volteos, recuperándose rápidamente a continuación. Si se comparan las hileras con soporte se observa que la hilera 2, con volteos diarios, alcanzó menores temperaturas durante toda la etapa que las restantes.

Etapa de curado o maduración

Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 3. No se consideró necesario mantener el control sobre los lixiviados ya que presentaron características similares al líquido del tanque de control. Por otro lado, se amplió la periodicidad de los volteos (20 a 30 días) y de medición de temperaturas. Esta última se midió hasta alcanzar la temperatura ambiente y de esta forma la estabilidad del producto. El seguimiento de la temperatura (Fig.1) permitió observar su descenso en el tiempo y evaluar el grado de estabilización del material cuando ya no se registraron recalentamientos.

Evaluación de la madurez del proceso

Se analizaron dos parámetros recomendados en la bibliografía: la relación entre C

soluble en agua y N total (CSA/NT < 0,7, Hue y Liu, 1995) y el porcentaje de reducción de materia orgánica o sólidos volátiles (> 38-40 %, USEPA, 1993; MDSyMA, 2001). El índice de madurez COT/NT propuesto por Golueke (1977) no fue aplicable en este caso, por cuanto la relación para los barros de Mar del Plata es de 19 (Tabla 1). Las 4 hileras ensayadas en este trabajo presentaron un comportamiento general común: disminución gradual del C orgánico total (COT), marcada disminución del CSA en los primeros 30 días del proceso y valores de NT constantes (datos no mostrados). Si bien el plan de muestreo se diseñó para lograr muestras representativas de cada hilera, los resultados obtenidos durante el proceso mostraron fluctuaciones que indicaron heterogeneidad de los barros y/o procesos de degradación diferentes en distintos sitios de las hileras. Esta fluctuación, observada para estos tres parámetros, enmascara en algunos casos el seguimiento de las diferencias temporales, principalmente cuando éstas son de escasa magnitud como se observó para CSA luego del día 30 y para N total durante todo el proceso. Esta observación es relevante, dado que estos parámetros son propuestos como indicadores de la madurez del material. La estrecha variación temporal poco resuelta y enmascarada en la incertidumbre de cada resultado de CSA y N total, muestra la dificultad de obtener un valor resultado del cociente de CSA/NT, que garantice la estabilidad del barro cloacal primario de Mar del Plata. La hilera 4 presentó las mayores fluctuaciones de CSA atribuibles a la heterogeneidad del barro.

El criterio de evaluación de la madurez a partir del análisis de reducción de materia orgánica mostró tener ventajas analíticas y operativas sobre el referido índice CSA/NT. El barro crudo presentó un alto contenido de materia orgánica, del orden de 80 % en peso seco, por lo tanto, una reducción del 38-40 % establece un rango de concentraciones amplio que puede sortear el enmascaramiento de la relación CSA/NT. Por otro lado, la determinación de materia orgánica por calcinación es un método sencillo, económico y rápido que permite un seguimiento más frecuente y un muestreo más intensivo para resolver la heterogeneidad detectada en el barro.

Los valores absolutos que indican la estabilidad y madurez del barro primario de Mar del Plata no necesariamente deben ajustarse a los encontrados para barros secundarios o de características diferentes. De acuerdo al análisis presentado, y en función del seguimiento temporal realizado, se propone alcanzar el valor del 40% de reducción de la materia orgánica para asegurar la estabilidad y madurez de hileras con comportamiento no homogéneo.

Aspectos microbiológicos

Los ensayos realizados cumplieron con la etapa de reducción de patógenos (temperaturas ≥ 55°C durante 15 días y 5 volteos) y el producto obtenido presentó una concentración de coliformes fecales y *Escherichia coli* < 1000 NMP/g de materia seca (Tabla 4), lo que asegura la calidad microbiológica requerida por la resolución ministerial utilizada como referencia para barros Tipo A.1 (sin restricción de uso). Adicionalmente, se realizaron análisis de huevos viables de helmintos tanto en el barro crudo como en el compost, encontrando ausencia de huevos viables por cada 4 g de materia seca en todos los casos (Tabla 4).

Sin embargo, la USEPA (1992), para demostrar calidad de barros Clase A por aplicación de tratamiento térmico, requiere que la reducción de patógenos esté acompañada en forma previa o simultánea por la reducción de la atracción de vectores y monitoreo del posible recrecimiento de patógenos (coliformes fecales como indicador). Esta condición, resguarda la posible recontaminación del barro, considerando además los muy bajos niveles de patógenos exigidos. Si la reducción de atracción de vectores no acompaña la de patógenos, un barro desinfectado por tratamiento térmico presenta probabilidad de recontaminación y/o recrecimiento, no solo por la alta carga orgánica biodisponible sino por la humedad y temperaturas que descienden durante el curado, alcanzando niveles adecuados para el desarrollo de patógenos. Considerando los criterios de la USEPA expuestos, y con relación a las pruebas ensayadas, se observó que las temperaturas de las hileras fueron > 55°C por más tiempo del exigido para cumplimentar la reducción de patógenos y que volteos posteriores condujeron varias veces a temperaturas similares (Fig. 1). Esto indica que, volteos periódicos y control de las condiciones de humedad mantienen por más tiempo temperaturas termofílicas como consecuencia de la actividad aeróbica, lo que acelera la reducción de materia orgánica y simultáneamente optimiza la reducción de patógenos y de atracción de vectores.

A fin de poder determinar que relación de soporte favoreció más la simultaneidad en la reducción de patógenos y la atracción de vectores, se determinaron períodos de riesgo de recontaminación del barro. Para ello se consideró el inicio del descenso de temperaturas por debajo de los 55°C (Fig. 1) y los tiempos en que se alcanzó la reducción de materia orgánica del 40%. Así se obtuvo un período de 65 días para las hileras 1 y 2, 111 días para la hilera 3 y 139 días para la hilera 4. Estos períodos de riesgo de recontaminación, se obtuvieron utilizando criterios muy conservativos en la

determinación de los tiempos de reducción térmica y de materia orgánica. Si se consideran los incrementos térmicos producidos ante los volteos del día 100 de tratamiento, la hilera 1 presentaría un período de riesgo de solo 17 días. Si además, se considera que el 40% de reducción de materia orgánica se alcanzó por primera vez para la hilera 1 el día 69, se cumpliría el requisito de reducción de vectores previo o simultáneo al tratamiento térmico. Finalmente, los resultados muestran que el riesgo de recontaminación del barro disminuye a mayor proporción de soporte y mayor periodicidad de volteos.

Lixiviados generados

Día de descarga:

Cuantificación de los volúmenes producidos

El volumen generado en el día de descarga fue de 750 litros correspondientes a 27 toneladas de barro cloacal. Cabe destacar que durante este tiempo no se produjeron lluvias. Por lo tanto, se determinó una lixiviación inicial del barro de 28 L/t.

Características físico-químicas y biológicas

La Tabla 5 muestra algunos parámetros indicadores de la calidad de este lixiviado, y como era de esperar, se encontraron altos valores de DBO y DQO. Las concentraciones de metales pesados fueron muy bajas, inferiores a las requeridas por la normativa de aplicación en la Provincia de Buenos Aires para disposición en distintos cuerpos receptores (ADA, 2003). Por otro lado, el potencial tóxico de los lixiviados producidos por los barros cloacales primarios de Mar del Plata, es estudiado sistemáticamente por OSSE a través de la ejecución de test de lixiviación de acuerdo a las recomendaciones y metodologías de la USEPA (1985). Los resultados obtenidos en más de 3 años de estudio (datos sin publicar) muestran muy bajos niveles de metales pesados en los lixiviados del barro cloacal de Mar del Plata, lo que en conjunto con los resultados encontrados en este estudio conforman un amplio marco para analizar el potencial tóxico de estos barros primarios y decidir sobre su uso, tratamiento o disposición final. La Tabla 9 muestra además que el lixiviado inicial presentó contenidos de N total, P y K que permiten analizar su potencial uso como fertilizante.

Hileras armadas:

Cuantificación de los volúmenes producidos

Durante las primeras 48 horas de armadas las hileras, los lixiviados fueron consecuencia del drenaje producido por el barro. Posteriormente, solo se registraron

lixiviados ante la presencia de lluvias. En las primeras 48 horas y sin registro de lluvias, las relaciones barro/soporte ensayadas produjeron volúmenes de lixiviados diferentes como consecuencia de la absorción de líquidos producida por el soporte. La hilera 4 (10 m³ de barro solo) lixivió 420 L durante las primeras 24 horas (42 L/t) y 180 L más a las 48 horas (18 L/t), total, 600 L, lo que indica una lixiviación del barro sin soporte luego de armada la hilera de 60 L/t de barro. La Tabla 6 presenta los volúmenes lixiviados por cada hilera y un análisis de la capacidad absorbente del soporte ("efecto esponja") respecto al volumen de lixiviación determinado para el barro sin soporte (60 L/t). Se observa que el lixiviado disminuye al aumentar la proporción del soporte.

Las diferencias en el volumen de lixiviado generado, es una variable importante a tener en cuenta en el análisis del comportamiento de las hileras. A mayor volumen de lixiviado mayor demanda para la gestión del mismo (tanques de recolección más grandes, mayores volúmenes para tratamiento, transporte y disposición final o reuso), por consiguiente, si se plantea la necesidad de reducir lixiviados, es aconsejable mayor proporción de soporte en el armado de las hileras. Sin embargo, otros factores como el tipo de soporte utilizado y su contenido de humedad al armar las pilas, son también relevantes cuando se busca optimizar la disminución de lixiviados iniciales.

Luego de la lixiviación inicial generada por los barros, solo se registraron lixiviados ante precipitaciones, en este caso, el volumen lixiviado también mostró el efecto de absorción del soporte (> disminución a mayor proporción de soporte). Así, una precipitación aproximada de 30 mm que generó 500 L de agua en el tanque de control, produjo una lixiviación de 215 L en la hilera 1, 240 L en la 2, 220 L en la 3 y 490 L en la 4. Estos resultados muestran una capacidad de absorción del soporte utilizado de 57, 52, 56 y 2 % respectivamente, lo que indica la pobre capacidad de absorción de agua de lluvia del barro solo y la relevancia del chip en la absorción de agua. La capacidad de absorción varía en función de la humedad de las hileras antes de la lluvia. Esto se observó durante la etapa de curado, donde luego de una quincena sin lluvias y con temperatura ambiente estival, las hileras presentaron bajos contenidos de humedad y porcentajes de retención > 70 % del agua caída en pilas con chip, e incluso en el orden de 50 % en la hilera con barro solo.

Características físico-químicas y biológicas

Los lixiviados iniciales de un barro, son en general, los denominados "fuertes" o "cargados" y consecuentemente los que más impacto al medio ambiente pueden ocasionar debido a su acidez o alcalinidad, contenidos elevados de elementos tóxicos,

materia orgánica, nitrógeno, etc. La Tabla 5 presenta la caracterización de los lixiviados producidos en las hileras ensayadas al inicio y final de la etapa de reducción de patógenos. Se observa que los lixiviados producidos al inicio de la etapa (sin Iluvias) presentaron muy alto contenido de materia orgánica con valores de DBO y DQO aún mayores que los del lixiviado del día de descarga del barro. Al final de la etapa los valores de DBO se redujeron al 2-4 % de los niveles originales; similar comportamiento presentó la DQO con una disminución del orden del 10 %, y concentraciones de P y K en los lixiviados finales también menores, pero en diferentes porcentajes según la hilera analizada. Las diferencias de concentraciones encontradas entre las hileras con distinta proporción de chip se ajustan con las diferentes masas de barro capaces de lixiviar presentes en cada plataforma. Los niveles de metales pesados encontrados fueron muy bajos, y al igual que el día de descarga, las concentraciones determinadas tanto al inicio como al final de la etapa termofílica se encontraron por debajo de los límites de vuelco a suelos absorbentes determinados por la normativa de aplicación (ADA, 2003).

Características físico-químicas y microbiológicas del producto final

La Tabla 4 presenta la caracterización físico-química y microbiológica del barro al inicio y del compost al finalizar el tratamiento. Se observa la transformación del barro primario en un producto ligeramente más alcalino, desinfectado, con una reducción de COT de más del 50%, igual o mayor concentración de N y P y menor concentración de K. En general, se observó una mayor concentración de metales pesados en el producto final, pero siempre estuvieron por debajo de los límites establecidos en guías y normas de referencia. La suma de N, P y K fue < 5%, consecuentemente, este producto estable y maduro alcanzó la categoría de enmienda orgánica (Ley de Fertilizantes) y su calidad cumplió con la Categoría A (sin restricción de uso) de la USEPA (1993) y el tipo A.1 de la MDSyMA (2001).

La reducción de volumen de las hileras (Tabla 4) durante el compostaje por pérdida de COT, implica la posibilidad de concentración de algunos elementos cuya pérdida por lixiviación o volatilización es menor que la pérdida de COT. Los niveles de metales pesados en el producto aunque bajos, mostraron esta tendencia y también los nutrientes N y P. El análisis de lixiviados (Tabla 5) mostró muy bajos niveles de metales pesados lo cual se corresponde con la baja concentración en el producto.

Compost de invierno

Como se mencionó en la introducción, se realizó una experiencia piloto en la época invernal (agosto 2001). En ésta solo se modificó el tipo de chip empleado dado que se utilizó poda (reciente y almacenada) de la ciudad. Si bien no se concluyó la evaluación total de esta prueba, se pueden destacar algunos aspectos comparativos respecto a la experiencia estival.

- Duración de las etapas mesofílica inicial y de reducción de patógenos: Para las relaciones ensayadas los tiempos de duración de la etapa mesofílica inicial fueron de 1 y 2 días en verano y 5 y 23 días en invierno para las relaciones 1:1 y 0,5:1, respectivamente. La etapa de reducción de patógenos fue de 15 días en verano para ambas relaciones y de 25 días en invierno para la relación 1:1; la relación 0,5:1 no cumplió en invierno con los requerimientos de esta etapa (solo cumplió 9 días). El comportamiento en invierno se podría atribuir a las bajas temperaturas ambiente y a lluvias frecuentes y la falta de eficiencia de la relación 0,5:1, a la menor proporción de chipeado, que en condiciones climáticas benignas (verano), no presentó inconvenientes.
- Importancia del soporte: Se verificó que ante una misma relación soporte/barro, se alcanzó la etapa de reducción de patógenos cuando se utilizó chip reciente, y no se alcanzó con chip almacenado a cielo abierto. Esto se podría atribuir al contenido de humedad de este último, por lo que se infiere la necesidad de una instalación semicubierta para su almacenamiento.

Conclusiones

- Se obtuvieron parámetros de diseño para el compostaje de los barros cloacales primarios de Mar del Plata a escala real.
- En verano, todas las relaciones soporte/barro ensayadas pueden ser aplicadas y los volteos diarios no tuvieron incidencia relevante en el proceso. Las etapas mesofílica inicial y de control de patógenos se alcanzaron más rápidamente que en invierno. En invierno sólo cumplió con la etapa termofílica la relación 1:1. El armado de hileras con soporte húmedo afectó desfavorablemente al proceso. El incremento en la periodicidad de volteos en verano mantuvo temperaturas termofílicas por mucho tiempo, disminuyendo el riesgo de reinfección.
- Se observó lixiviación del barro crudo en las 72 horas posteriores a su descarga,
 luego solo lixivió ante precipitaciones. A mayor proporción de soporte, se observó

menor volumen de lixiviados durante todo el proceso (menor requerimiento de gestión), y menor atracción de vectores, olores, tiempo de tratamiento y riesgo de recrecimiento y contaminación bacteriana. La calidad físico-química del lixiviado mejoró al avanzar el tratamiento (disminución de DBO y DQO) y los niveles de metales pesados fueron muy bajos. Las concentraciones de N y P en los lixiviados sugieren que podrían ser utilizados como fertilizantes.

 Se determinó que el índice de madurez más apropiado para estos compost es la reducción de materia orgánica. El producto final obtenido cumple con la categoría tipo A.1 de la MDSyMA (2001) y la Clase A de la USEPA (1993), sin restricción de uso y alcanza la categoría de enmienda orgánica según la Ley Nacional Nº 20466/73 (Ley de Fertilizantes).

Consideraciones finales

Los resultados obtenidos en las Pruebas Piloto realizadas permitieron formular el Proyecto de la Planta de Compostaje para tratar la totalidad de los barros cloacales generados, el cual fue incorporado al Proyecto del Tratamiento Integral de los Efluentes Cloacales de la ciudad de Mar del Plata, actualmente en ejecución.

Bibliografía

- ADA (Autoridad del Agua de la Provincia de Buenos Aires). 2003. Normas de calidad de los vertidos de los efluentes líquidos residuales y/o industriales a los distintos cuerpos receptores de la Provincia de Buenos Aires. Resolución 336/03, Argentina
- Council Directive. 1986. CEC-Council of the European Communities. Council directive on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture. 86/278/EEC.
- Golueke C. 1977. Biological Reclamation of Solid Wastes. Rodale Press, Emmaus, EEUU. 249 pp.
- Hue N.V. y Liu J. 1995. Predicting compost stability. Compost Science and Utilization 3: 8-15.
- Laos F., Mazzarino M.J., Satti F., Roselli L, Moyano S., Ruival M. y Moller-Poulsen L. 2000. Planta de compostaje de biosólidos: Investigación y desarrollo en Bariloche, Argentina. Ingeniería Sanitaria y Ambiental 50: 86-89.

- Ley Nacional Nº 20466. 1973. Reglamentación, contralor de la elaboración, importación, exportación, tenencia, fraccionamiento, distribución y venta de fertilizantes y enmiendas, en todo el territorio de la República (Decreto Reglamentario Nº 4830 y Resoluciones 244/89, 310/94 y 410/94), Argentina.
- MDSyMA (Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente). 2001. Reglamento para el Manejo de Barros Generados en Plantas de Tratamiento de Efluentes Líquidos. Resolución 097/01, Argentina. 20 pp.
- MPGP (Municipalidad del Partido de General Pueyrredón). 2001. Mar del Plata en dos hojas. Estadística de la Municipalidad, Mar del Plata, Argentina.
- Peralta E. 1998. Informe comparativo de tecnologías para el tratamiento de los barros cloacales de la ciudad de Mar del Plata. Unidad de Gestión Ambiental, Obras Sanitarias Mar del Plata S.E., Argentina
- Peralta E., González R., von Haeften G., Comino A., Gayoso G., Vergara S., Genga G. y Scagliola M. 2002-2003. Experiencia piloto de compostaje de barros primarios cloacales de Mar del Plata. Publicado en tres partes en revista Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 1º Parte 64: 44-50; 2º Parte 65: 49-53, 3º Parte 66: 41-47
- Scagliola M. 1998. Proyecto de optimización para la estabilidad de barros cloacales de Mar del Plata mediante la utilización de lombricultura. Laboratorio de Aguas, Obras Sanitarias Mar del Plata S.E, Argentina
- USEPA. 1985. Hazardous Waste Management System; Proposed Rule and Request for Comment Federal Register: Part 2, 40 CFR Part 261.
- USEPA. 1992. Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge, (Including Domestic Septage), Under 40 CFR Part. 503.
- USEPA. 1993. Standards for the use or disposal of sewage sludge. U.S. Gov. Print. Office, Washington D.C., EEUU. Federal Register 58: 9248-9415.

Tabla 1. Caracterización físico-química del barro cloacal de la ciudad de Mar del Plata en muestras compuestas de 24 hs. Período 1999-2008

Parámetro	n	Promedio	Máximo	Mínimo	S. D.
Humedad (%)	89	79,8	87,0	63,8	5,0
Sólidos Totales (%)	33	20,2	28,9	14,7	3,5
Sólidos Fijos (%)	26	3,3	8,2	1,7	1,4
Sólidos Volátiles (%)	26	16,9	21,6	12,5	2,6
Materia Orgánica (%)	34	85,7	89,9	77,1	2,9
COT (%)	34	42,8	44,9	38,5	1,5
P total (g/kg)	35	6,2	15,1	1,8	2,8
N total (g/kg)	35	24,4	33,3	17,4	3,7
Proteínas (%)	35	15,3	20,9	10,9	2,4
Aceites y grasas (g/kg)	29	180,5	275,0	64,8	50,5
Hidrocarburos Totales (g/kg)	14	5,6	10,4	2,5	2,6
Zn (mg/kg)	33	302,7	628,0	174,7	116,6
Cu (mg/kg)	33	466,8	2194,5	56,6	514,1
Cd (mg/kg)	32	1,2	7,0	0,2	1,2
Pb (mg/kg)	33	56,6	143,8	19,2	30,5
Ni (mg/kg)	30	14,2	98,4	4,3	17,0
Cr (mg/kg)	33	22,7	201,3	5,6	36,0
Hg (mg/kg)	18	0,5	1,7	0,2	0,4

Tabla 2. Programa de monitoreo de la prueba piloto

ETAPA	BARROS		LIXIVIADOS		
	Parámetros	Periodicidad	Parámetros	Periodicidad	
Inicial	Conductividad eléctrica	,	рН		
molal	Nitrógeno total	Única vez	Sólidos sedimentables	Día de descarga y	
	Fósforo]	Nitratos	al inicio y final de la	
	Humedad		Fósforo	etapa de reducción	
	рН		Potasio		
	Temperatura		DBO	de patógenos	
	Metales pesados		DQO		
	Coliformes fecales]	Metales pesados]	
	Huevos viables de helmintos				
Reducción de patógenos	Temperatura	Diaria			
Curado	Humedad				
Curado	pH	Quincenal (con			
	Nitrógeno total	volteos previos)			
	Amonio]			
	Carbono soluble en agua (CSA)				
	Coliformes fecales]			
	Huevos viables de helmintos]			
Compost	Conductividad eléctrica	,			
Compost	рН	Única vez			
	Carbono total				
	Nitratos]			
	Nitrógeno total]			
	Fósforo				
	Metales pesados				
	Coliformes fecales				

Tabla 3. Características del proceso durante las etapas de reducción de patógenos y de curado

Hilera	Duración de la etapa (días)	% reducción de MO	Reducción total de volumen (%)	Nivel de percepción de olores	Atracción de vectores				
Etapa d	Etapa de reducción de patógenos								
H1	15		20,3	0 a 1	+				
H2	17		32,9	0 a 1	++				
H3	15		24,3	1 a 2	++				
H4	15		21,2	3 a 4	+++				
Etapa d	Etapa de curado								
H1	101	45,4	41,9	0	-				
H2	99	41,0	54,5	0	-				
H3	158	43,6	53,8	0	-				
H4	181	43,1	60,6	1	+				

Tabla 4. Características del barro crudo y del producto final

	Barro crudo			Compost				
	H1	H2	H3	H4	H1	H2	H3	H4
Humedad (%)	73,5	75,1	76,6	76,4	55,9	58,0	61,5	65,5
pH	6,20	6,80	6,10	6,40	7,87	7,92	7,72	7,98
Conductividad eléctrica (µS cm ⁻¹)	1802	1869	2640	1807	611	600	809	685
COT (g/kg)	385	395	409	395	183	212	219	225
NT (g/kg)	20,4	16,0	21,2	20,0	17,6	18,1	23,4	22,2
Fósforo (g/kg)	4,78	4,70	6,08	4,82	4,6	6,68	10,83	9,97
Potasio (g/kg)	0,91	0,92	1,15	1,04	0,56	0,61	0,64	0,39
Nitratos (g/kg)	0,137	0,014	0,027	0,009	0,010	0,003	0,004	0,002
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	0,9 * 10 ⁷	2,0 * 10 ⁷	$5,5 \cdot 10^7$	2,5 * 10 ⁷	96	55	932	778
Huevos de <i>Ascaris</i>		auser	ntes		ausentes			
CSA (g/kg)	59,0	68,6	88,1	69,4	11,1	11,6	11,4	12,7
COT/ NT	18,7	24,7	19,3	19,7	10,4	11,7	9,4	10,1
CSA/ NT	3,03	4,31	4,19	3,47	0,63	0,64	0,49	0,57
% Reducción materia orgánica	-	ı	-	-	52,6	46,3	46,3	43,1
Cu (mg/kg)	81	106	936	104	524	451	1072	1779
Zn (mg/kg)	419	224	322	240	335	369	556	623
Pb (mg/kg)	123,9	33,1	39,3	49,2	71,6	195,9	116,5	508,0
Cd (mg/kg)	0,30	0,38	0,32	0,41	0,47	0,57	0,88	0,92
Ni (mg/kg)	23,3	21,4	7,1	3,9	27,2	7,8	12,9	12,0
Cr (mg/kg)	14,5	11,7	10,8	9,5	20,5	15,9	15,7	41,8
Hg (mg/kg)	0,14	1,26	0,21	0,51	0,31	0,90	0,56	2,58

Tabla 5. Características del lixiviado al día de descarga y al inicio y final de la etapa de reducción de patógenos

	Día de	Inicio etapa reducción patógenos				Final etapa reducción patógenos				
	descarga		Hileras				Hileras			
		H1	H2	Н3	H4	H1	H2	Н3	H4	
рН	6,50	6,90	6,90	6,20	6,20	6,80	6,90	6,80	7,30	
SS. 2 h (mg/L)	0,40	0,20	0,10	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,10	< 0,1	< 0,1	
DBO (mg/L)	4990	9430	8070	11310	11230	233	181	298	485	
DBO (mg/L)	8290	14700	13460	15180	21360	1126	881	1494	2736	
NT (mg/L)	385					94,6	93,6	102,4	275,1	
Nitratos (mg/L)						0,44	0,09	1,37	0,24	
P (mg/L)	103,0	73,0	67,7	106,0	126,5	43,2	18,6	19,2	19,9	
K (mg/L)	154	487	555	1008	1144	58	44,5	34,10	58,60	
Cu (mg/L)	0,07	0,11	0,11	0,11	0,08	0,25	0,22	0,64	0,71	
Zn (mg/L)	0,20	0,24	0,26	0,28	0,18	0,11	0,12	0,16	0,23	
Pb (mg/L)	< 0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Cd (mg/L)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,007	0,008	0,009	0,009	
Ni (mg/L)	0,188	<0,132	<0,132	0,152	<0,132	<0,132	<0,132	<0,132	0,159	
Cr (mg/L)	0,037	<0,021	<0,021	0,041	0,028	<0,021	<0,021	<0,021	<0,021	
Hg (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	

Tabla 6. Cuantificación del volumen y retención de los lixiviados

Hilera	Volumen de	Volumen (L)		Retención de	Absorción del
	barro en la	Medido Capacidad de		lixiviados ^b (L)	soporte ^c (%)
	hilera (m³)		lixiviación ^a		
H1	5,0	68	300	232	77
H2	5,0	50	300	250	83
НЗ	6,6	280	396	116	30
H4	10,0	600	600	0	0

^a Capacidad de lixiviación = (lixiviación medida en H4 * volumen de barro H4) / volumen de barro Hx

^b Retención de lixiviación = Capacidad de lixiviación – Volumen medido

^c Absorción del soporte = Retención de lixiviados * 100 / Capacidad de lixiviación

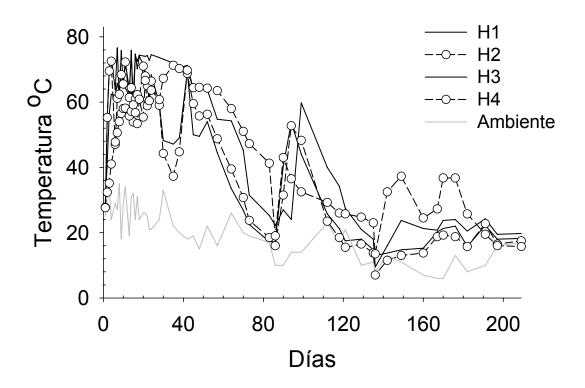


Fig. 1. Comportamiento de la temperatura en las 4 hileras durante el proceso de compostaje.



Foto 1. Esquema de recolección de lixiviados y fotos del proceso de armado de las pilas.



Foto 2. Mediciones de temperatura, volteos y producto final