

## EXPERIENCIA PILOTO DE COMPOSTAJE DE BARROS PRIMARIOS CLOACALES DE MAR DEL PLATA

Autores(\*): Peralta, E.; González, R.; von Haeften, G.; Comino, A.; Gayoso, G.; Vergara, S.; Genga, G. & Scagliola, M.

**Elisabet Peralta. Ingeniera Química (UNMDP). Responsable del control de efluentes industriales de OSSE (1988-1996). Jefe de Área Instalaciones Industriales de OSSE (1996-1998) Realizó sobre este tema un workshop (beca) en el exterior sobre Adopción, Aplicación y Operación de Tecnologías “Sanas” Medioambientales (EST’s) - Alemania (UNEP-1996) y una pasantía teórico-práctica sobre compostaje de barros cloacales - Bariloche (UN del Comahue-2000). Miembro de la Unidad de Gestión Ambiental de OSSE (1998-2000). Se desempeña actualmente como responsable de la mencionada Unidad.**

**Roberto González. Técnico Químico (E.N.E.T. N°1 MDP). Analista del laboratorio de Residuales O.S.N. (1979/1981), de D.O.S.B.A. Mar del Plata (1981/1984) y de Obras Sanitarias Mar del Plata (1984/1992). Jefe de análisis laboratorio O.S.S.E (1992/1996). Realizó sobre este tema una pasantía teórico-práctica sobre compostaje de barros cloacales - Bariloche (CRUB-Univ.Nac del Comahue-2000). Desde 1996 a la fecha a cargo del laboratorio de efluentes .**

**Gabriela von Haeften. Licenciada en Química (UNMDP). Laboratorio de Ecotoxicología, Univ Nac de Mdp (1993-1995). Personal Laboratorio de Medio Receptor de OSSE (1998 - 2000). Personal Laboratorio de Aguas de OSSE (2000 a la fecha). Responsable de análisis de metales pesados del presente trabajo.**

**Ana Paula Comino. Licenciada en Química (UNMDP) . Personal Laboratorio de Medio Receptor de OSSE (1998 - 2000). Personal Laboratorio de Aguas de OSSE (2000 a la fecha). Responsable de los análisis microbiológicos del presente trabajo.**

**Gustavo Gayoso. Técnico Químico (E.N.E.T. N° 1 MDP). Personal Laboratorio de Efluentes, Área Laboratorio de Aguas de OSSE (1992 a la fecha). Colaborador de análisis físico-químicos del presente trabajo.**

**Sergio Vergara. Técnico Químico (E.N.E.T. N° 1 MDP). Personal Laboratorio de Química de OSSE (1992-1998). Personal Laboratorio de Medio Receptor de OSSE (1998 - 2000). Personal Laboratorio de Aguas de OSSE (2000 a la fecha). Colaborador de los análisis microbiológicos del presente trabajo.**

**Carlos Genga. Técnico Químico (E.N.E.T. N° 1 MDP) Personal Laboratorio de Efluentes, Área Laboratorio de Aguas de OSSE (1992 a la fecha). Colaborador de análisis físico-químicos del presente trabajo.**

**Marcelo Scagliola. Licenciado en Biología (UNMDP). Investigador - Laboratorio de Medio Ambiente - Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (1988-1992). Personal del Laboratorio de OSSE (1992 - 1997). Jefe Laboratorio Medio Receptor de OSSE (1997 - 2000). Jefe Laboratorio de Aguas de OSSE ( 2000 a la fecha). Responsable de Aspectos Ambientales de la Planta depuradora de efluentes cloacales de Mar del Plata. Realizó sobre este tema pasantía teórico-práctica sobre compostaje de barros cloacales - Bariloche (UN del Comahue-2000).**

(\*) Son miembros de distintas áreas de la Gerencia de Calidad de Obras Sanitarias Mar del Plata (OSSE) - Brandsen N° 6650 -Mar del Plata - Argentina -Tel.: 0223-4992980-Fax: Int. 503 E-mail: [calidad@osmgp.gov.ar](mailto:calidad@osmgp.gov.ar) ó [gambiental@osmgp.gov.ar](mailto:gambiental@osmgp.gov.ar)

Palabras claves: barros cloacales, lixiviados, compost, reuso

## RESUMEN

Se estudio el compostaje (hileras) como alternativa de gestión del barro cloacal (25 toneladas / día), evaluando el proceso durante verano e invierno, relaciones soporte: barro ( 1:1, 0,5:1 y 0:1), volteo diario o a demanda y características cuantitativas, físico-químicas y microbiológicas del barro y lixiviados.

En verano todas las relaciones pueden aplicarse, en invierno solo 1:1, volteos a demanda permiten mejor control del proceso. A mayor soporte menos lixiviados, tiempo de tratamiento y riesgo de recontaminación. Se encontraron bajas concentraciones de metales pesados en barros y lixiviados. Se demostró la factibilidad del proceso y la clase A del producto.

## INTRODUCCIÓN

### Características de la ciudad y su sistema de alcantarillado

Mar del Plata es una ciudad costera de la República Argentina de 590.000 habitantes (1), ubicada al sudeste de la Provincia de Buenos Aires (38° de LS, 57°35' LO), (Fig. 1).

Figura 1: Ubicación de la ciudad de Mar del Plata



Las principales actividades comerciales e industriales están relacionadas con la pesca y el turismo generando un importante desarrollo comercial e industrial. Durante el período estival, su población se incrementa en un 25 % con aumento en las actividades de la ciudad. Consecuentemente, se vuelca a las colectoras cloacales un volumen variable de efluentes según la época del año.

Mar del Plata posee un sistema de alcantarillado que permite la recolección conjunta de los efluentes cloacales e industriales. Este consta de redes cloacales y de cuatro colectoras máximas que transportan los efluentes del 85,2 % de la ciudad a la Planta de Pretratamiento de Efluentes Cloacales "Ingeniero Baltar" ubicada 10 Km. al norte del centro de la ciudad. Asimismo son vertidos en la Planta, efluentes transportados por camiones atmosféricos (67000 m<sup>3</sup> anuales), provenientes de pozos ciegos y de residuos de sistemas de tratamiento primario industriales. 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 para su estabilización natural. La caracterización físico química del barro primario se presenta en la Tabla 1, (2).

El presente estudio se realiza en el marco de un plan de gestión de efluentes que incluye la remodelación de la planta de pretratamiento actual y construcción de un emisario submarino.

### Gestión de los barros primarios

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, Obras Sanitarias Mar del Plata 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.

Las tecnologías analizadas fueron: lombricultura, inertizado y compostaje (3). En el primer caso, en base a una prueba piloto (4) que permitió observar los beneficios y desventajas que ésta posee.

Los resultados comparativos indicaron, en primera instancia, al compostaje como el sistema de tratamiento más apropiado ya que éste es considerado una tecnología ambientalmente "sana" por cuanto minimiza los riesgos hacia la salud (pública y ambiental) y la utilización de fertilizantes químicos en la agricultura.

El compostaje es un proceso aeróbico controlado, que acelera la degradación natural de la materia orgánica de un residuo transformando a éste en un producto lo suficientemente inocuo y estable para poder ser empleado como un acondicionador de suelos.

Este proceso es aplicable a residuos orgánicos que posean contenido de metales pesados inferiores a lo establecido en las normativas y guías de referencia (Tabla 2).

Tabla 1: Caracterización físico química del barro cloacal de la ciudad de Mar del Plata en muestras compuestas de 24 hs. Período 1999 - 2001

		n	Prom	Máx	Min	S D
Humedad	%	13	81,49	83,97	76,07	1,99
Sólidos Totales	%	13	18,51	23,93	16,03	1,99
Sólidos Fijos	%	13	2,54	3,41	1,65	0,44
Sólidos Volátiles	%	13	15,97	21,32	13,55	1,89
Materia Orgánica	%	13	86,24	89,88	82,50	2,30
Fósforo Total	gP/Kg	14	5,45	7,11	2,41	1,40
N.T.K.	gN/Kg	14	22,70	28,18	17,37	3,42
Aceites y grasas	g/Kg	14	172,86	275,00	64,77	60,90
Hidrocarburos Totales	g/Kg	14	5,59	10,40	2,51	2,57
Zn	mg/Kg	12	280,81	413,11	174,74	69,90
Cu	mg/Kg	11	370,42	909,03	56,65	269,39
Cd	mg/Kg	12	1,04	1,79	0,17	0,51
Pb	mg/Kg	12	63,10	143,80	32,23	30,57
Ni	mg/Kg	9	11,12	21,07	4,99	4,86
Cr	mg/Kg	12	15,93	46,60	5,64	10,72
Hg	mg/Kg	3	0,43	0,76	0,19	0,30

Tabla 2 – Rangos comparativos del contenido de metales de pesados del barro de Mar del Plata con los establecidos por la normativa nacional e internacional de referencia

Elementos (mg/Kg)	Barros primarios	Resolución Nacional N° 97/2001 (5)	USEPA 1993 (6)	Unión Europea 1986 (7)
Cadmio	0.17 - 1.79	20 – 40	39 – 85	20 – 40
Cromo	5.64 - 46.60	1000 – 1500	1200 – 3000	1000 – 1750
Cobre	56.65 – 909.03	1000 – 1750	1500 – 4300	1000 – 1750
Mercurio	0.19 – 0.76	16 – 25	17 – 57	16 – 25
Níquel	4.99 – 21.07	300 – 400	420	300 – 400
Plomo	32.23 – 143.80	750 – 1200	300 – 840	750 – 1200
Zinc	174.74 – 413.11	2500 - 4000	2800 - 7500	2500 - 4000

El sistema del compostaje consiste en mezclar un sustrato con un soporte (aserrín, viruta, material de poda, etc.) pudiendo efectuarse de dos maneras:

- a) abierto : ésta se divide en pilas estáticas aireadas y en hileras (windrows)
- b) cerrado: cuando el proceso se realiza en un reactor

Durante el proceso se observan tres etapas de actividad microbiana y temperaturas asociadas: mesofílica, termofílica y curado.

- Etapa mesofílica: En esta etapa inicial comienza a elevarse la temperatura de la mezcla hasta un valor menor a los 55 ° C.
- Etapa termofílica: es el período en que la temperatura es  $\geq 55^\circ \text{C}$  y ésta se mantiene durante tres días (pilas aireadas) ó 15 días con un mínimo de 5 volteos mecánicos (hileras). El objetivo de esta etapa es el tratamiento térmico para una fuerte reducción de organismos patógenos. De esta forma se obtiene la desinfección del barro y el comienzo de la estabilización del mismo.
- Etapa de curado: se caracteriza por la reducción de la actividad microbiana y por ende de la temperatura, concluyendo así el proceso de estabilización. Los índices que determinan la finalización de esta etapa son:
  - ❖ de estabilidad : que se verifica cuando cae la temperatura a la del ambiente y no se producen recalentamientos.
  - ❖ de madurez: que se confirma cuando el carbono no es más hidrolizable. Los parámetros que brindan esta información varían según los criterios adoptados por Organismos de aplicación y/o investigaciones específicas ; algunos de ellos se detallan en la Tabla 3:

Tabla 3- Indicadores de maduración del barro

Parámetros	Porcentaje de reducción de sólidos volátiles	Deflexión de oxígeno disuelto	Relación CSA/ N total	Relación COT/N total	Relación CSNaOH/ CSA
Organismos					
Resolución Ministerial Nacional N° 97/ 01	> 40 %	$\leq 10\%$ en promedio del O <sub>2</sub> disuelto en agua dest.			
USEPA	$\geq 38\%$				
Golueke -1977(8)				$\leq 20$	
Hue and Liu-1995-(8)			$\leq 0,7$		$\geq 6$

Los tiempos del proceso de compostaje varían desde semanas hasta meses (5 ó 6) dependiendo del sistema empleado (reactores, pilas ó hileras).

El producto obtenido, compost, es un acondicionador de suelos de acuerdo con lo establecido en las guías y normativas de referencia. La calidad del mismo determinada principalmente por sus concentraciones microbiológicas y contenido de metales pesados, es lo que limitará sus usos. Éstos pueden ser de varios tipos, entre otros: agrícola-ganadero, forestal, recuperación de suelos degradados, restauración del paisaje.

Obras Sanitarias 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).

En el país no se conocen antecedentes previos sobre el compostaje de barros primarios; es por ello que este estudio presenta una experiencia inédita de la aplicación de esta tecnología para estos residuos, la cual está basada en el desarrollo que para el tratamiento de barros secundarios cloacales ha implementado la ciudad de San Carlos de Bariloche (9).

## OBJETIVOS

Los objetivos de este estudio son (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.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Metodología operativa

La prueba piloto se realizó en una parcela cedida por el propietario del Vivero en el cual se vienen disponiendo los barros como ya se ha mencionado. Se empleó el tipo de compostaje por hileras con volteos mecánicos.

Para cumplimentar los objetivos planteados se requirió previamente de:

- ❑ la construcción de 4 plataformas impermeables de hormigón cuyas dimensiones fueron de 6 m x 6 m cada una con su correspondiente sistema de recolección de lixiviado. Este último consistió en que cada mitad de cada plataforma tuviera pendiente lateral hacia las esquinas de forma tal de permitir que el lixiviado generado acometa a los tanques (cap. 600 l aprox.) enterrados a nivel de suelo para tal fin.
- ❑ la calibración previa de los tanques .
- ❑ el chipeado de la poda de los árboles existentes en el Vivero (foto 1 y 2)



foto 1



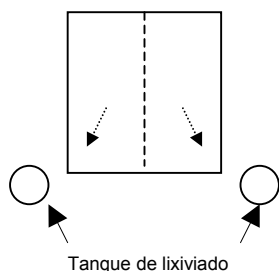
foto 2

- ❑ el acondicionamiento (encalado) y traslado de los barros crudos pertenecientes a un día de extracción de la Planta de pretratamiento.
- ❑ una pala mecánica frontal
- ❑ el armado de un Programa de monitoreo de análisis y de controles de proceso.

La prueba piloto de verano se inició a principios de febrero del 2001 y consistió en:

- Día de descarga: el día 6 se recepcionó el barro crudo (27 Tn aprox.) transportado en contenedores desde la Planta (unos 40 Km de distancia), los cuales se descargaron sobre una de las 4 plataformas (foto 3). En ese lugar permaneció todo un día, simulando así como sucedería en una planta real; de esta forma se pudo cuantificar y analizar el lixiviado generado siendo éste el más concentrado que se puede obtener en todo el proceso.

- Día de armado: el día 7 se procedió al armado de cada hilera. Con el fin de realizar comparaciones de eficiencia y comportamiento, sobre cada plataforma se colocó una hilera de 10 mezclando sólido cloacal y madera chipeada en distintas proporciones: hileras 1 y 2, partes iguales (R: 1:1); hilera 3, dos partes de sólido y una de soporte (R: 0,5:1) y la hilera 4, sólido solo (R:0). El tamaño aproximado de cada hilera fue 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 proceso.



Tanque de lixiviado

Los volúmenes indicados fueron estimados en función de la capacidad del balde de la pala empleada que en este caso fue de 0,75 m<sup>3</sup>.

La mezcla del barro con el chipeado se realizó intercalando los baldes de la pala de acuerdo con las relaciones establecidas (foto 4) y una vez terminadas se voltearon sobre el otro lateral libre de cada plataforma de forma tal de homogeneizar la mezcla (foto 5).

Una vez finalizada esta tarea, se procedió a la toma de muestras según lo previsto en el programa de monitoreo.

Ese mismo día se realizó la toma de muestras del lixiviado generado por el barro crudo en la plataforma de descarga y su correspondiente medición de altura de éstos en los tanques. Una vez concluido se procedió a vaciar los mismos, de forma tal que permita



recolectar los lixiviados que se producirían en el proceso. Esta tarea se efectuó con una bomba sumergible accionada por un grupo electrógeno.



foto 3



foto 4



foto 5

- Controles diarios del proceso: con la finalidad de evaluar el comportamiento del sistema se midieron los siguientes parámetros:
  - las condiciones climáticas: la temperatura ambiente, la orientación del viento y la cantidad de lluvias caídas.
  - la temperatura: la medición se realizó en cuatro puntos de la hilera, excluyendo los extremos, (foto 6) y a dos profundidades distintas (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.
  - los 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 (foto 5). La medición era directa ya que se introducía un metro en el tanque para obtener la altura y con ésta se empleaba la curva de calibración ya mencionada. Cabe aclarar que los tanques, cuando así lo requerían, eran vaciados mediante el procedimiento descrito anteriormente.
  - el 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.
  - los volteos: se efectuaron 5 volteos durante la etapa termofílica con excepción de la hilera 2 (volteos diarios) empleando una pala frontal (foto 7).
  - nivel de 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 (+++).



foto 6

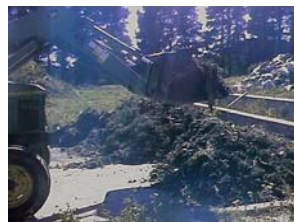


foto 7



foto 8

- Tamizado del barro curado: mediante zarandeo mecánico se obtuvo el producto ,compost, (foto 8) y se recuperó el chip para un posible reuso.

## Métodos analíticos

**Muestreo de lixiviados.** Los lixiviados fueron recolectados con recipiente de acero inoxidable en el tanque colector. Una porción se colocó en botella plástica con tapa a rosca de 2000 ml de capacidad para la determinación de parámetros químicos. Para DBO se extrajeron 2 frascos específicos de 300 ml de capacidad; para metales pesados una botella plástica de 1000 ml y fueron conservadas con ácido nítrico ( $\text{pH} < 2$ ).

**Muestreo de barros.** Las muestras se extrajeron tomando porciones de barro en 6 lugares diferentes de cada hilera y a 30 cm de profundidad, resultando un total de aproximadamente 1 kg de muestra por cada hilera que se colocó en bolsas plásticas. Para la determinación de huevos de ascaris, en particular, se efectuaron muestreos a dos profundidades: entre 0 y -50 cm y entre 50 y 100 cm.

Las muestras fueron conservadas para su transporte al laboratorio, donde se inició en forma inmediata el tratamiento analítico. El tiempo transcurrido entre la toma de muestras y su análisis fue de 2 horas.

**Técnicas analíticas aplicadas a los barros.** Para el análisis de parámetros químicos, los barros se secaron en estufa a 60 °C, y se molieron previa separación del chip. Todos los análisis se realizaron por duplicado. Para los análisis microbiológicos se analizó la muestra húmeda por cuadruplicado.

- Materia orgánica (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, (10) SM 2540 E, 20 ed, con tiempo de calcinación ampliado a 4hs).
- Carbono Orgánico Total (COT), a partir del valor de materia orgánica (factor de correlación: 0.5) (11).
- Nitrógeno Total Kjeldhal (NTK), (SM 4500 B 18 ed., con medición final por colorimetría)(12) Mineralización con peróxido de hidrógeno en digestor Hach modelo Digesdhal. Lectura de concentraciones con espectrofotómetro Sequoia Turner Modelo 690.
- Fósforo total, (SM, 4500 P E 20 ed, método del ácido ascórbico). Mineralización con peróxido de hidrógeno en digestor Hach modelo Digesdhal. Lectura de concentraciones con espectrofotómetro Sequoia Turner Modelo 690.
- Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Cr: Pretratamiento de la muestra por digestión ácida nítrico-clorhídrico (2.5:1) en microondas (Multiwave Paar Physics-Perkin-Elmer), durante 45 min, temperatura máxima de 200°C a 75 bar; lectura de concentraciones por espectrofotometría de absorción atómica de llama aire-acetileno, corrección de background por lámpara de deuterio (Equipo Aanalyst 300, Perkin-Elmer) (10).
- Hg: (Adaptación Perkin-Elmer al método EPA 245: Digestión de barro seco en botellas de DBO, con agua regia y permanganato de potasio, peróxido de hidrógeno y reducción con cloruro estannoso). Lectura, técnica de vapor frío (13).
- Bacterias coliformes fecales y *Escherichia coli*. (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater cap 9221A, punto 3 y 9221E y F, 20 ed).
- Temperatura : medición in situ. Termómetro analógico de 1,20 m de jabalina.

Se obtuvo un extracto acuoso para la determinación de otros parámetros químicos. Para ello, una parte de barro seco y molido en 10 partes de agua destilada (14) se sometió a agitación mecánica durante 2 horas a 200 rpm. El extracto se filtró con membrana de 0.45 micras (poro) para el análisis de los siguientes parámetros:

- pH, con electrodo de cristal
- Nitrógeno de Nitratos -  $\text{NO}_3\text{-N}$ , (S.M. 4500 E, (10), reducción en columna de cadmio).
- Conductividad Eléctrica, con conductímetro Hach modelo CO 150.
- Potasio, por fotometría de llama, con equipo Metrolab 305.
- Carbono soluble en agua (CSA), medido como DQO por el método de reflujo cerrado (SM 5220D) (10) y lectura de concentraciones con espectrofotómetro Hach DR 4000.

**Técnicas analíticas aplicadas a los lixiviados.**

- pH, con electrodo de cristal.
- sólidos sedimentables en 2 horas (S.M. 2540 F) (10).
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (D.B.O<sub>5</sub>), (S.M. 5210 B por el método de diluciones) (10).
- Demanda Química de Oxígeno (D.Q.O.), (S.M. 5220 D) (10).
- N.T.K. método aplicado en barros.
- $\text{NO}_3\text{-N}$ , método aplicado en barros.
- Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Cr, método aplicado en barros.

- Hg: (Adaptación Perkin-Elmer al método EPA 245.5: Digestión de lixiviados en botellas de DBO con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: HNO<sub>3</sub> 1:2 y permanganato de potasio, peróxido de hidrógeno y reducción con cloruro estannoso). Lectura en Equipo Analyst 300, FIAS 100 y AS 90, Perkin-Elmer (15).

## RESULTADOS

### Recepción del barro cloacal primario

**Característica físico químicas del barro recepcionado.** Veinticuatro horas después de la recepción del barro, luego de armada las hileras, se realizó un muestreo de los barros. La Tabla 4, presenta los resultados de los análisis físico químicos y microbiológicos realizados (valores medios de las 4 plataformas). Puede observarse que excepto humedad y materia orgánica, los resultados se ajustan a los encontrados en los últimos tres años de muestreo de barros primarios de Mar del Plata (Tabla 1). El barro muestreado y a compostar presentó contenidos inferiores de humedad y materia orgánica como consecuencia de pérdidas por lixiviación, absorción del chip y volatilización de compuestos y absorción por chip durante las 24 hs previas al muestreo (ver lixiviados) y a la actividad de mezclado. Fósforo, Nitrógeno y metales pesados, presentaron concentraciones similares a las características del barro. Por lo tanto, el barro empleado para la prueba piloto es representativo del barro cloacal primario de la ciudad.

Tabla 4: Características físico químicas del barro cloacal primario utilizado para la prueba piloto.

		Promedio	SD
Humedad	%	75,39	1,43
pH		6,38	0,31
C.E.	uS cm <sup>-1</sup>	2030	408
Materia orgánica	%	79,2	2,0
C.O.T.	gC/Kg	395,8	9,8
C.S.A.	gC/Kg	71,3	12,2
N.T.K.	gN/Kg	19,4	2,3
Nitratos(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	gNO3-/kg	0,05	0,06
Fósforo total	gP/kg	5,10	0,66
Potasio	gK/kg	1,01	0,11
Coliformes fecales	NMP/g seco	2,25 10 <sup>7</sup>	
Escherichia Coli	NMP/g seco	1,70 10 <sup>7</sup>	
Cu	mg/kg	306,79	419,34
Zn	mg/kg	301,38	89,49
Pb	mg/kg	61,36	42,20
Cd	mg/kg	0,35	0,05
Ni	mg/kg	13,92	9,84
Cr	mg/kg	11,65	2,12
Hg	mg/kg	0,30	0,16

### **Lixiviados generados**

Evaluación cuantitativa. el volumen generado en estas 24 horas fue de 750 litros correspondientes a las 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/ton. Evaluación cualitativa. La tabla 7 (primera columna) muestra la concentración de algunos



parámetros indicadores de la calidad de este lixiviado. Como era de esperar en lixiviados iniciales, se encontraron altos valores de DBO y DQO. Respecto al contenido de metales pesados, se determinaron muy bajas concentraciones de los elementos analizados. Los niveles encontrados son inferiores a los requeridos por la normativa de aplicación en la Provincia de Buenos Aires para disposición en distintos cuerpos receptores (Resolución 389/98) (16).

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 EPA. (17). Los resultados obtenidos en más de 3 años de estudio (18) 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 7 muestra además que el lixiviado inicial presenta contenidos de nitrógeno total, fósforo y potasio que permiten analizar su potencial uso como fertilizante.

### **Etapa Mesofílica**

Las condiciones climáticas para esta etapa y la termofílica en la prueba de verano fueron con una temperatura ambiente promedio de 27,25° C y 5 días de lluvia, incluyendo una precipitación de 70 mm caída en un lapso de tres horas aproximadamente. Bajo estas condiciones climáticas la duración de esta etapa fue: hilera 1 y 2 de solo 1 día, hilera 3: 2 días e hilera 4: 7 días (fig. 3) Como se puede observar se mantuvo una relación inversamente proporcional a la cantidad de soporte.

El nivel de olores en el primer día fue de 5, el máximo de la escala en todas las hileras, disminuyendo luego en forma directa a la mayor cantidad de chipeado. Por esta razón, la hilera 4 (barro solo) fue la de mayor generación de olores.

### **Etapa termofílica**

#### **Control del Proceso**

Como se explicara anteriormente, el objetivo de esta etapa es la reducción de patógenos por tratamiento térmico. La tabla 5 presenta el período de duración de esta etapa para cada hilera ensayada y el comportamiento de distintos parámetros de control del proceso.

Tabla 5. Etapa termofílica. Control de proceso

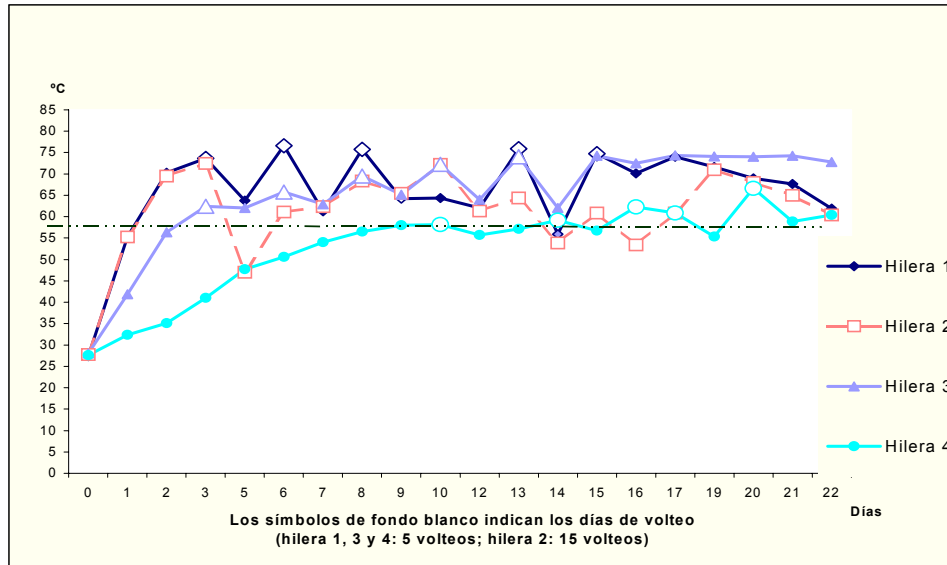
Hilera	Duración de la etapa (días)	Cantidad de volteos	Reducción del volumen (%)	Nivel de percepción de olores	Atracción de vectores
1	15	5	20.33	0 a 1	+
2	17	15	32.87	0 a 1	++
3	15	5	24.32	1 a 2	++
4	15	5	21.22	3 a 4	+++

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 pese a utilizar barbijo. El análisis de atracción de vectores incluyó la presencia de gusanos tanto en las hileras como en los lixiviados.

La fig.3 presenta el comportamiento de las temperaturas en cada hilera durante las etapas mesofílica y termofílica y los días de volteo.

Como se puede observar las caídas de las curvas para cada caso responden al enfriamiento producido por los volteos, recuperando rápidamente las temperaturas anteriores. Otro aspecto de este mismo efecto es que si comparamos las tres hileras que poseen soporte, se encuentra que en general la hilera 2, que tuvo los volteos diarios, alcanzó menores temperaturas durante toda la etapa que las restantes, siendo en éste caso más relevante la capacidad de recuperación térmica de la hilera.

Fig. 3 - Comportamiento de la temperatura en las 4 hileras en las etapas mesofílica y termofílica



**Lixiviados Generados**

Evaluación cuantitativa: Armadas las hileras, comenzaron los procesos de lixiviación. Durante la primeras 48 hs los lixiviados fueron consecuencia del drenaje producido por el barro. Posteriormente solo se registraron lixiviados ante la presencia de lluvias.

En las primeras 48 hs, 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 m<sup>3</sup> de barro solo) lixivió 420 l durante las primeras 24 hs (42 l/tn) y 180 l más a las 48 hs (18 l/tn), total, 600 l; lo que indica una lixiviación del barro sin soporte luego de armada la hilera de 60 l / tn de barro. La Tabla 6 presenta los volúmenes lixiviados por cada hilera y un análisis de la capacidad absorbente del soporte (efecto esponja), utilizando el volumen de lixiviación determinado para el barro sin soporte (60 l/tn).

Tabla 6. Análisis cuantitativo de los lixiviados iniciales

hilera		volumen de la hilera (m <sup>3</sup> )			volumen de lixiviado (l)		retención de lixiviado por el soporte utilizado		absorción del soporte (%)
N°	relación chip:barro	parte de barro	parte de soporte	total	medido (registro de 48hs)	capacidad de lixiviación de la masa de barro	capacidad de lixiviación - medido (l)	l/m <sup>3</sup> de chip	
1	1:1	5	5	10	68	300	232	46	77
2	1:1	5	5	10	50	300	250	50	83
3	0.5:1	6.6	3.3	10	280	396	116	35	30
4	0:1	10	0	10	600	600	0	0	0

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 tipo de soporte utilizado y su contenido de humedad al armado de 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 por las hileras también mostró el efecto de absorción del soporte y consecuente disminución de volumen a mayor proporción de este. Así, una precipitación aproximada de 30 mm, que generó 500 l de agua en el tanque de control produjo una lixiviación de: H1: 215 l; H2: 240 l; H3: 220 l e H4: 490 l. Estos resultados muestran una capacidad de absorción del soporte utilizado de 57, 52, 56 y 2 % respectivamente, lo que determina 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 el proceso de compostaje pero ya en la etapa de curado, donde luego de una quincena sin lluvias y con temperatura ambiente estival, las hileras presentaron bajos contenidos de humedad, aumentando su capacidad de retención de agua, así porcentajes de retención por encima del 70 % del agua caída se registraron en pilas con chip, e incluso en el orden de 50 % de retención de agua en la hilera con barro solo.

Evaluación cualitativa. 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 7 presenta la caracterización química de los lixiviados producidos en las hileras ensayadas al inicio y final de la etapa termofílica.

Se observa que los lixiviados producidos al inicio de la etapa (sin lluvias) tienen muy alto contenido de materia orgánica indicado por los valores de DBO y DQO que son aún mayores que los del lixiviado del día de descarga del barro, que se justificaría por los efectos de la presión del barro sobre el proceso de lixiviación. Al final de la etapa los valores de DBO se reducen al 2 o 4 % de los niveles originales; similar comportamiento presentó la DQO con una disminución menor en las concentraciones iniciales del orden del 10 %, y fósforo y potasio con concentraciones en los lixiviados finales también menores pero en diferentes porcentajes según la hilera analizada. Se destaca el comportamiento del cobre cuya concentración aumenta en los lixiviados del final de la etapa termofílica. Asimismo se detectaron concentraciones muy bajas de cadmio en el lixiviado final. Las diferencias de concentraciones encontradas entre las hileras con distinta proporción de chip se ajustan con las diferentes masas de barro capaz de lixiviar presentes en cada plataforma.

Los niveles de metales pesados encontrados son muy bajos, y al igual que lo determinado para el día de descarga las concentraciones determinadas tanto al inicio como al final de la etapa termofílica se encuentran debajo de los límites de vuelco a suelos absorbentes determinado por la normativa de aplicación (16).

Tabla 7 - Características del lixiviado inicial y del fin de la etapa termofílica -

PARAMETROS	DIA DE DES-CARGA	ETAPA INICIAL				FIN ETAPA TERMOFILICA			
		Hilera 1	Hilera 2	Hilera 3	Hilera 4	Hilera 1	Hilera 2	Hilera 3	Hilera 4
pH	6.50	6.90	6.90	6.20	6.20	6.80	6.90	6.80	7.30
S.S. 2 h (ml/l)	0.40	0.20	0.10	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.10	< 0.1	< 0.1
D.B.O. (mg/l)	4990	9430	8070	11310	11230	233	181	298	485
D.Q.O. (mg/l)	8290	14700	13460	15180	21360	1126	881	1494	2736
N.T.K. (mg/l)	385	---	---	---	---	94.64	93.55	102.35	275.09
Nitratos (mg/l)	---	---	---	---	---	0.44	0.09	1.37	0.24
Fósforo (mg/l)	103	73	67.70	106	126.5	43.28	18.64	19.20	19.90
Potasio (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

### Etapa de Curado

Como se explicó anteriormente, el objetivo de esta etapa es alcanzar la estabilidad y madurez del producto. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 8:

Tabla 8 - Etapa de curado. Control del proceso-

Hilera	Duración de la etapa (días)	Índice de madurez (% reducción de M.O.) *	Reducción total de volumen (%) *	Nivel promedio de percepción de olores	Atracción de vectores
1	101	45.43	41.9	0	-
2	99	41.04	54.5	0	-
3	158	43.64	53.8	0	-
4	181	43.05	60.6	1	+

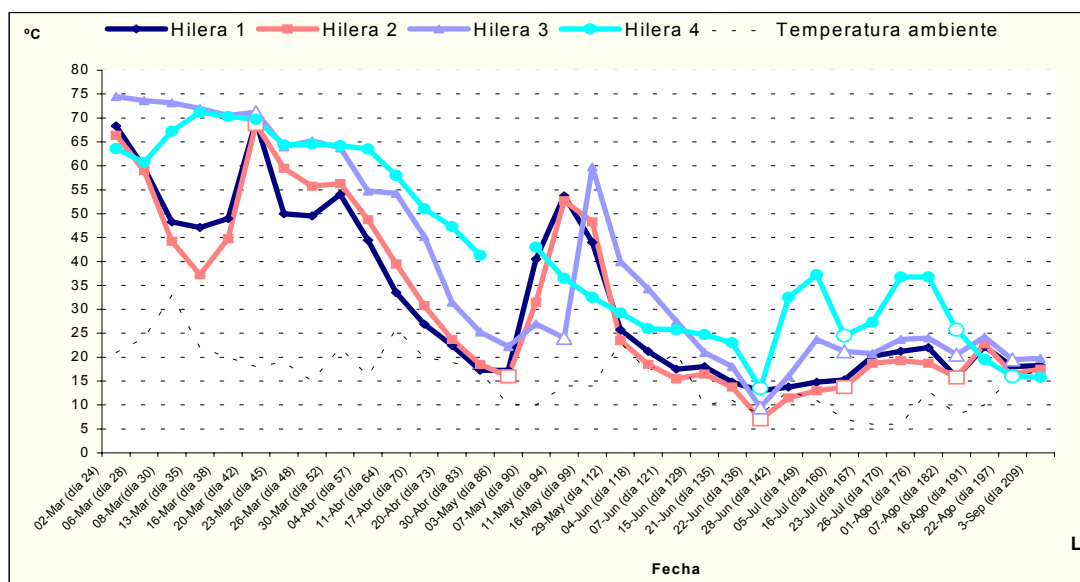
(\*) Datos para todo el proceso desde el inicio del tratamiento

No se consideró necesario mantener el control sobre el lixiviado ya que éste presentó 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. En este último caso se midió hasta alcanzar la temperatura ambiente y de esta forma la estabilidad del producto.

### Índice de estabilidad:

La figura 4 muestra el comportamiento de la temperatura en las 4 hileras durante la etapa de curado, incluyendo la temperatura ambiente. El seguimiento de este parámetro permite observar el descenso de la temperatura en el tiempo y evaluar el grado de estabilización del barro que se alcanza cuando no se registran recalentamientos. Los volteos producen oxigenación de las hileras con posible recalentamiento cuando existe materia orgánica hidrolizable y el factor limitante para su degradación aeróbica es el oxígeno.

Fig. 4 - Comportamiento de la temperatura en las 4 hileras durante la etapa de curado- (Los símbolos de fondo blanco indican los días de volteo)



Se observó que durante aproximadamente 30 días las 4 hileras mantuvieron temperaturas termofílicas ( $\geq 55^\circ \text{C}$ ). lo que minimiza riesgos de reinfección (ver aspectos microbiológicos). Las temperaturas de las hileras 1 y 2 bajaron al inicio de esta etapa recuperando niveles superiores a los  $55^\circ \text{C}$ . Esto se atribuye a las precipitaciones registradas entre los días 13 y 20 de marzo que produjo un aumento del contenido de humedad de las mismas y favoreció así la actividad microbiana. Posteriormente se observaron incrementos de temperatura en las hileras al efectuar volteos, lo que indica la falta de estabilidad del barro. El gráfico muestra que las hileras 1, 2 y 3 presentan comportamientos similares y son menos sensibles a los volteos a partir del 22 de junio (136 días de tratamiento) donde se registraron temperaturas más estables. Sin embargo la hilera 3, con mayor proporción de barro, presentó temperaturas levemente mayores. La hilera 4 (barro solo) mostró respuesta más "lenta" a todo el tratamiento en comparación con las otras hileras (ver etapa termofílica), alcanzando temperaturas estables a partir de los volteos del 7 de agosto (182 días de tratamiento).

Por otro lado, es de destacar que si bien las formas de las curvas de las 4 hileras registran una gran similitud (hilera 4 desplazada en el tiempo), se observa que a mayor proporción de soporte los descensos de temperatura son más rápidos.

**Índice de madurez:** Se ha explicado que el compostaje de barros con alto contenido orgánico, incluye una etapa termofílica caracterizada por elevadas temperaturas. Estas altas temperaturas (responsables de la reducción de patógenos), ocurren como consecuencia de gran liberación de calor producida por una intensa degradación de compuestos orgánicos del barro a formas más sencillas y estables como consecuencia de la digestión bacteriana aeróbica favorecida por la introducción forzada de oxígeno al sistema.

Consecuentemente, y para que estos procesos ocurran, se requiere de suficiente cantidad de materia orgánica biodegradable por actividad bacteriana, 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 barro, 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 barro analizada anteriormente y la madurez del producto final. Conforme avanza el tratamiento, las bacterias degradan materia orgánica bajando su concentración, puede deducirse que el cambio de una de las variables alterará el sistema descripto, 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.

La prueba piloto desarrollada en verano para el compostaje de los barros primarios de Mar del Plata, es analizada en este apartado en consideración a los fundamentos antes explicados. La Fig. 5 muestra para cada una de las hileras ensayadas el contenido de carbono orgánico total (COT), carbono soluble en agua (CSA) y nitrógeno total durante el proceso de compostaje. Las cuatro hileras ensayadas presentaron un comportamiento general común: disminución gradual de la concentración de COT, gran disminución del CSA en los primeros 30 días del proceso y valores de nitrógeno total constantes. Si bien el plan de muestreo se diseñó para lograr muestras representativas de cada hilera, los resultados obtenidos durante el proceso muestran fluctuaciones que denotan inhomogeneidad del barro y o procesos de degradación diferentes en distintos sitios de las hileras. Esta fluctuación, observada para los tres parámetros estudiados, enmascara en algunos casos el seguimiento de las diferencias temporales, principalmente cuando estas son de escasa magnitud como se observa en el seguimiento de CSA luego del día 30 y nitrógeno total durante todo el proceso. Esta observación es relevante, dado que estos parámetros son propuestos como indicadores de la madurez del barro (Tabla 3). La estrecha variación temporal poco resuelta y enmascarada en la incertidumbre de cada resultado de CSA y nitrógeno total, muestra la dificultad de obtener un valor resultado del cociente de las concentraciones de CSA : nitrógeno total que garantice la estabilidad del barro cloacal primario de Mar del Plata. La hilera 4 presentó las mayores fluctuaciones de CSA atribuibles a la inhomogeneidad del barro.

La Fig. 6, muestra, el seguimiento de dos de los índices propuestos para la determinación de la madurez de la composta en cada una de las hileras ensayadas. 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 de CSA : nitrógeno total: El barro crudo presenta un alto contenido de materia orgánica, en el orden de 80 % en peso seco, por lo tanto una reducción del 40 o 38 % (Tabla 3) durante el proceso 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 inhomogeneidad detectada en el barro. Los gráficos presentados para la relación CSA/NT muestran inicialmente una rápida disminución del índice para luego mantenerse dentro de los valores de incertidumbre muestral. El valor de relación 0.7 (8) indicado en el gráfico, es el adoptado para los barros cloacales secundarios de la ciudad de San Carlos de Bariloche y no necesariamente este valor corresponde a la madurez del barro primario de Mar del Plata.

La madurez de los barros cloacales de Mar del Plata ha sido evaluada mediante el seguimiento de estas dos metodologías de referencia: reducción de materia orgánica y relación CSA/NT. Sin embargo, el índice de madurez COT/NT propuesto por Golueke, 1977 (8), no es aplicable en este caso, por cuanto la relación para los barros de Mar del Plata es de 19 (Tabla 1). 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.

Tabla 9 - Características del barro crudo y del producto y final

PARAMETROS	BARRO CRUDO				COMPOST			
	Hilera 1	Hilera 2	Hilera 3	Hilera 4	Hilera 1	Hilera 2	Hilera 3	Hilera 4
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
C.E. ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	1802	1869	2640	1807	611	600	809	685
C.O.T. (g/Kg)	385	395	409	395	183	212	219	225
N.T.K. (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)	$9.05 \cdot 10^6$	$2.01 \cdot 10^7$	$5.54 \cdot 10^7$	$2.54 \cdot 10^7$	96	55	932	778
Huevos de Ascaris	ausentes				ausentes			
C.S.A. (g/Kg)	58.95	68.60	88.10	69.40	11.05	11.60	11.44	12.70
COT/ NT	18.73	24.67	19.27	19.71	10.37	11.73	9.36	10.13
CSA/ NT	3.03	4.31	4.19	3.47	0.63	0.64	0.49	0.57
% Reducción M.O.	0	0	0	0	52.57	46.33	46.32	43.05
Cu (mg/kg)	81.4	105.8	935.6	104.3	524.4	451.4	1072.1	1779.3
Zn (mg/kg)	419.2	224.2	322.1	240.0	335.2	368.6	556.0	622.8
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



Fig 5.: Contenido de carbono orgánico total, carbono soluble en agua y nitrógeno total (g. Kg<sup>-1</sup>) del barro durante el proceso de compostaje en verano

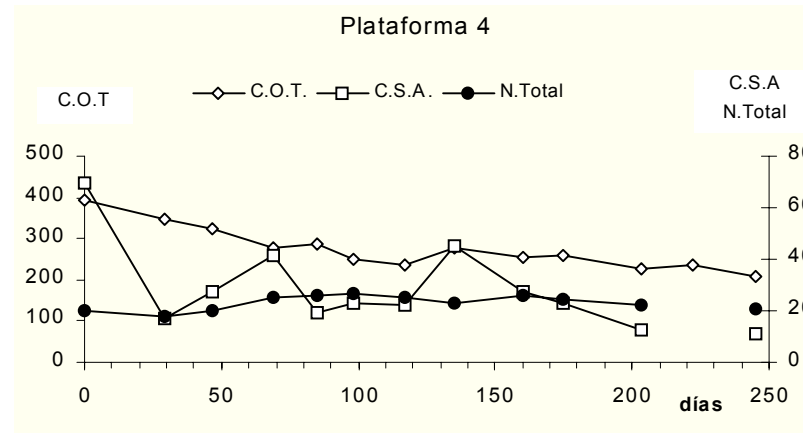
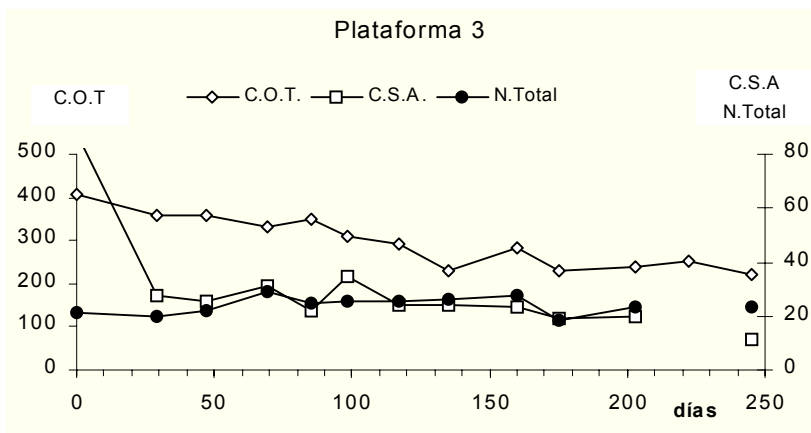
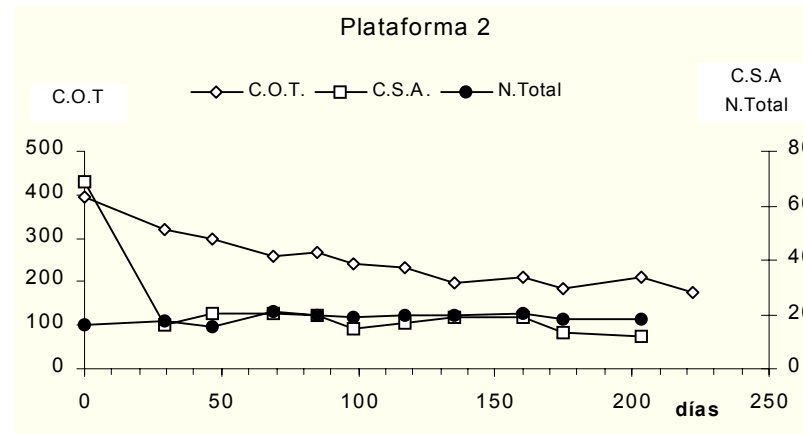
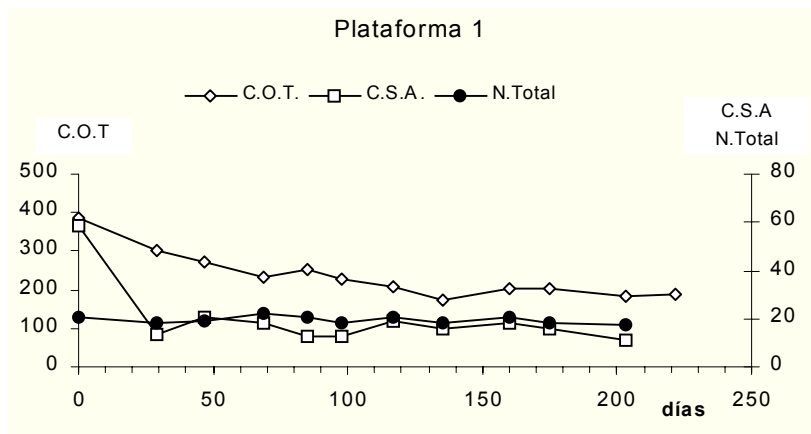
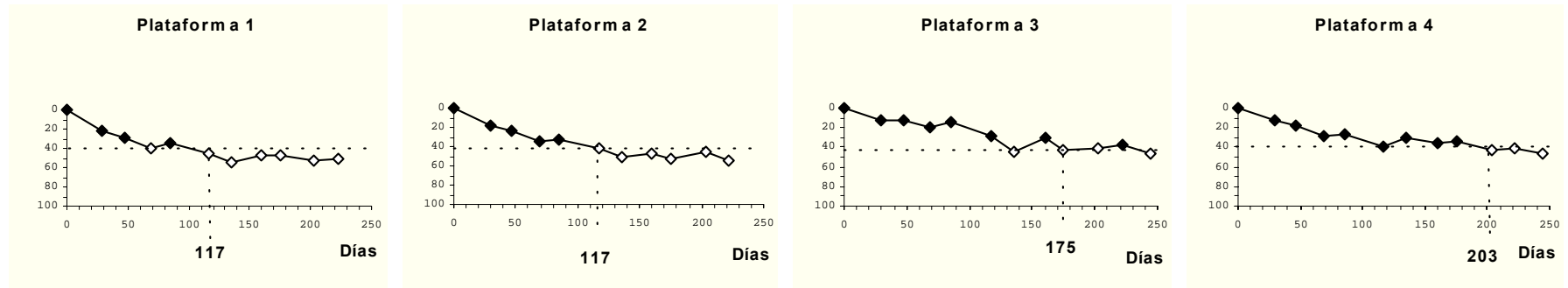
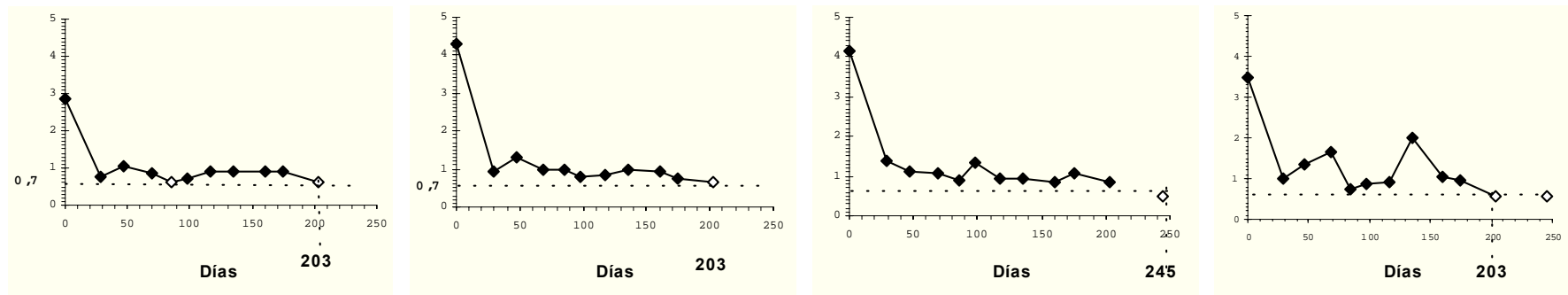


Fig. 6: Índices de madurez durante el proceso de compostaje en verano  
 (Los símbolos de fondo blanco indican los valores de cumplimiento)

Reducción de materia orgánica (%)



Relación Carbono soluble en agua: Nitrógeno total



**Aspectos microbiológicos:** El objetivo central de la tecnología de compostaje es el tratamiento térmico para la reducción de patógenos. El cumplimiento de la etapa termofílica (temperaturas > 55°C durante 15 días y 5 volteos) asegura una fuerte reducción de patógenos al final de esta etapa. Los ensayos realizados cumplieron esta condición, posteriormente, comenzó la etapa de curado para lograr estabilidad y madurez del barro (reducción de atracción de vectores) y finalmente el producto obtenido, presentó una concentración de coliformes fecales y *escherichia coli* por debajo de 1000 NMP / g de barro seco (tabla 9), que junto al tratamiento térmico previo asegura la calidad microbiológica requerida por la Resolución Nacional (5) 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 tratado, encontrando ausencia / 4 g de barro seco en todas las muestras analizadas (tabla 9).

Sin embargo la EPA (19), 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 en la atracción de vectores y monitoreo del posible recrecimiento a partir de 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 alta probabilidad de recontaminación y /o recrecimiento, no solo por la alta carga orgánica biodisponible sino por la humedad presente y temperaturas que durante el curado descienden alcanzando niveles adecuados para el desarrollo de patógenos.

Considerando los criterios de EPA expuestos, y con relación a las pruebas ensayadas, se observa que las temperaturas de las hileras mantuvieron niveles por encima de 55°C por más tiempo del exigido para cumplimentar la etapa termofílica, y que ante volteos durante el curado, se lograron nuevamente estas altas temperaturas (fig. 4). Consecuentemente, y para evitar el riesgo de recontaminación durante el curado, volteos periódicos y control de las condiciones de humedad mantendrían por más tiempo temperaturas termofílicas, Asimismo, favoreciendo mayor actividad aeróbica durante el curado, la reducción de materia orgánica se consigue en menor tiempo y consecuentemente la simultaneidad en reducción de patógenos y atracción de vectores puede ser optimizada.

A los fines 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. 4) y los tiempos en que se alcanzó la reducción de materia orgánica del 40% (fig. 6). Así se obtuvieron para la hilera 1 y 2: 65 días; hilera 3: 111 días e hilera 4: 139 días. 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) a mayor proporción de soporte y (b) incrementando la periodicidad de volteos.

**Característica físico - química y microbiológica del producto final.** La Tabla 9 presenta la caracterización físico química y microbiológica del barro antes y después del tratamiento por compostaje durante el verano. Se observa la transformación del barro cloacal primario en un producto ligeramente más alcalino con una reducción en la concentración del carbono orgánico de más del 50%, desinfectado y con niveles de metales pesados por debajo de los límites establecidos en guías y normas de referencia. La suma de las concentraciones de N<sub>2</sub>, P y K es menor al 5%; consecuentemente este producto estable y maduro (ver apartado correspondiente) alcanza la categoría de enmienda orgánica (ley de fertilizantes) (20) y su calidad cumple con la Categoría A de la USEPA (sin restricción de uso) y el tipo A.1 de la Resolución Nacional 97/01 (5).

La reducción de volumen de las hileras (Tabla 8) durante el compostaje por pérdida de carbono orgánico, implica la posibilidad de concentración de algunos elementos cuya pérdida por lixiviación o volatilización no sigan la pérdida de carbono orgánico. Los niveles de metales

pesados en el producto aunque bajos, mostraron esta concentración. El análisis de lixiviados (Tabla 7) mostró muy bajos niveles de metales pesados lo cual se corresponde con la concentración en el producto.

### CONSIDERACIONES

Como se menciona 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 de la ciudad.

Si bien no concluyó la evaluación total de esta prueba, se puede afirmar algunos aspectos comparativos respecto a la experiencia estival.

- Duración de las etapas mesofílica y termofílica: Para las relaciones ensayadas (R:1:1 y 0.5:1) los tiempos de duración de estas etapas se observan en la Tabla 10.

TABLA 10 - Periodos comparativos de la duración de las etapas mesofílica y termofílica en las pruebas de verano e invierno -

DURACIÓN DE LA ETAPA (días)	RELACION 1:1		RELACION 0,5:1	
	Verano	Invierno	Verano	Invierno
Mesofílica	1	5	2	23
Termofílica	15	25	15	-----

La diferencia observada en la duración de la etapa termofílica (R:1:1) se debe a las pronunciadas caídas de temperaturas producidas durante los volteos y a la escasa recuperación térmica de la misma. Este comportamiento se podría atribuir a las bajas temperaturas ambiente y a la alta periodicidad de lluvias.

Con respecto a la relación 0.5:1, no se alcanzó la totalidad de la etapa termofílica ya que no pudo superar el noveno día. Esto podría ser atribuible a la menor relación de chipeado que en condiciones climáticas benignas (verano), no indicó mayores inconvenientes.

- Importancia del soporte: Se verificó que ante una misma relación (soporte barro), utilizando chip reciente en una hilera y chip almacenado a cielo abierto en otra, en este último caso no se alcanzó la etapa termofílica. Esto se podría tribuir al contenido de humedad del mismo; por lo que se infiere la necesidad de poseer una instalación semicubierta para su almacenamiento. Por otra parte es de destacar que si bien se emplearon chip de distintas especies de árboles en ambas pruebas, ambas fueron aptas para el tratamiento.

### CONCLUSIONES

- Se demostró la factibilidad de compostar los sólidos estudiados.
- En verano, todas las relaciones soporte barro ensayadas, pueden ser aplicadas.
- En invierno sólo cumplió con la etapa termofílica la relación 1:1.
- El volumen lixiviado por el barro crudo en tiempo seco (sin lluvias) fue de: día de descarga, 28 l/tn y día de armado de las hileras (hilera 4 -barro solo) 42 l/tn y al segundo día de 18l/tn. Por lo tanto, se determinó una capacidad total de lixiviación del barro crudo, sin lluvias, de 88 l/tn en las 72 horas posteriores a su descarga. Luego solo lixivió ante precipitaciones.
- A mayor proporción de soporte, se observó menor: volúmenes de lixiviados durante todo el proceso (menor requerimiento de gestión); atracción de vectores; generación de olores; tiempo de tratamiento y riesgo de recrecimiento y contaminación bacteriana.
- El armado de hileras con soporte húmedo afecta desfavorablemente al proceso.

- La calidad fisicoquímica del lixiviado mejora conforme avanza el tratamiento (disminución de DBO y DQO).
- Los niveles de metales pesados analizados en los lixiviados son muy bajos y cumplen con la normativa provincial vigente para el vuelco a distintos cuerpos receptores.
- Las concentraciones de N<sub>2</sub> y P en los lixiviados permiten analizar la posibilidad de su empleo como fertilizante.
- En verano, las etapas mesofílica y termofílica se alcanzaron más rápidamente que en invierno.
- Los volteos diarios ensayados en verano no tuvieron incidencia relevante en el proceso.
- Se determinó que el índice de madurez más apropiado para estos barros es la reducción de materia orgánica.
- Se concluyó que el incremento en la periodicidad de volteos, en verano, mantiene temperaturas termofílicas y consecuentemente disminuye el riesgo de reinfección del barro.
- El producto final obtenido cumple con la categoría tipo A.1 de la Resolución Nacional (5) y la Clase A de la EPA (6), sin restricción de uso; y alcanza la categoría de enmienda orgánica (concentraciones N<sub>2</sub>,P y K menores al 5%) , ley de fertilizantes (20).
- Se obtuvieron parámetros de diseño para el compostaje de los barros cloacales primarios de Mar del Plata a escala real.

### **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece la colaboración brindada por el propietario del vivero Van Heden y personal de distintas Areas de OSSE (Gerencia de Servicios y Unidad de Dirección de la Planta Ing. Baltar) que permitieron hacer posible la realización de este trabajo.

### **Referencias bibliográficas**

- 1- Mar del Plata en dos hojas, 2001. Estadística de la Municipalidad del Partido de General Pueyrredón.
- 2- Laboratorio de Aguas, Obras Sanitarias Mar del Plata S.E., 2001. "Proyecto: Caracterización y monitoreo del efluente sólido". Informe inédito.
- 3- Gerencia de Calidad, Obras Sanitarias Mar del Plata S.E., 1998. Informe comparativo de tecnologías para el tratamiento de los barros cloacales de la ciudad de Mar del Plata.
- 4- Laboratorio de Aguas, Obras Sanitarias Mar del Plata S.E.,1998. Proyecto de optimización para la estabilidad de barros cloacales de Mar del Plata mediante la utilización de lombricultura.
- 5- Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente, 2001. Resolución N° 97. Reglamento para el Manejo de Barros Generados en Plantas de Tratamiento de Efluentes Líquidos.
- 6- USEPA, 1993. Standards for the use or disposal of sewage sludge. Federal Register 58 (32) 9248-9415. U.S. Gov. Print. Office, Washington D.C.
- 7- Council Directive of The European Communities, 1986. On the Protection of the Environment and in particular of the soil, when sewage sludge is used in Agriculture. 86/278/EEC.
- 8- Hue N.V., Liu J., 1995. Predicting Compost Stability. Compost Science & Utilization. 3: 8-15.
- 9- Laos F., Mazzarino M., Satti P., Roselli L., Moyano S., Ruvial M., Moller Poulsen L., 2000. Planta de compostaje de biosólidos. Investigación y desarrollo en Bariloche, Argentina. Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS Argentina.
- 10- American Public Health Associaton, 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20 th ed.

- 11- Navarro A.F., Cegarra J., Roig A., y Bernal P. 1990. Análisis de residuos urbanos agrícolas, ganaderos y forestales: relación materia orgánica-carbono orgánico. En "III Congreso Internacional de Química de la ANQUE. Residuos sólidos y líquidos: su mejor destino". Fondo Editorial ANQUE. Madrid, España, pp 447-456.
- 12- American Public Health Association, 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18 th ed.
- 13- Lobring L., Potter B., 1991. Determination of Mercury in Sediments by Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry, method 245.5. Environmental Monitoring Systems Laboratory Office of Research and Development. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio, pp 267-280.
- 14- García C., Hernández T. and Costa F., 1991. Study on Water Extract of Sewage Sludge Composts. Soil Sci. Plant Nutr. 37: 399-408.
- 15- McIntosh S., Welz B., 1992. Perking Elmer, method 245.1 A; Determination of Mercury in Drinking Water and Wastewater By Flow Injection Atomic Absorption Spectrometry (Cold Vapor Technique). ENV-12 A.
- 16- Administración General de Obras Sanitarias de la Provincia de Buenos Aires, 1998. Resolución N° 389. 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.
- 17- E.P.A., 1985. 40 CFR, Part 261.
- 18- Laboratorio de Aguas, Obras Sanitarias Mar del Plata S.E., 2001. "Proyecto: Caracterización y monitoreo del potencial tóxico de los sólidos cloacales". Informe inédito.
- 19- EPA. Environmental Regulations and Technology, 1992. Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge, (Including Domestic Septage), Under 40 CFR Part. 503.
- 20- Ley Nacional N° 20466 de Fertilizantes y Enmiendas Orgánicas, 1973.

#### Bibliografía

- Metcalf & Eddy—Ed. Mc Graw—Hill, inc., 1991. Wastewater Engineering Treatment, Disposal, Reuse.
- Ontario Clean Water Agency Eastern Area, 1995. Biosolids Management Technology Review.
- Muñoz Ratto E., 1999. Proyecto de reglamentación para la valorización agrícola de los biosólidos.
- Mazzarino M.J.; Laos F.; Satti P.; Roselli L.; Costa G.; Moyano S.; Semenas L.; Brugini N.; Viozzi G.; Ruival M.; Mendoza M.; Burgoa C., 1997. Lodos cloacales en Bariloche: de residuos peligrosos a recurso agronómico. Ingeniería Sanitaria y Ambiental 30.

Mar del Plata, abril 2002.