

## APROVECHAMIENTO AGRÍCOLA DEL LODO GENERADO EN LA PTAR DE PUENTE PIEDRA - LIMA

Francisco Atencio, Jenny<sup>a</sup>; Ramos Matías, Pedro<sup>b</sup>; Aguirre Yato, Guillermo<sup>c</sup>

### RESUMEN

Se llevaron a cabo a nivel de invernadero y en macetas, ensayos preliminares de fertilización en diferentes dosis de lodo procedente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR - Puente Piedra, Lima – Perú, con el objetivo de determinar su aprovechamiento agrícola. Se aplicó el diseño estadístico completamente al azar DCA, y el método estadístico de la varianza – ANVA y el Test de Tukey ( $P \leq 0,05$ ) para el análisis de las variables agronómicas de emergencia de la plántula (s), altura (H), grosor del tallo (D) y materia seca ( $F_p$ ) de la planta indicadora de maíz (*Zea mays L.*). El ensayo N° 1, contenía dosis de lodo seco 0, 2, 4, 6, 8 y 10 %, mezclado con arena lavada, y el ensayo N° 2 contenía dosis de lodo compostado de 0, 25, 50, 75 y 100 %. En ambos casos se usó un fertilizante inorgánico, control NPK 300-400-200 (en partes por millón, ppm). Los resultados estadísticos mostraron diferencias altamente significativas de las variables a mayores dosis de lodo seco o lodo compostado respectivamente. En tanto, el porcentaje de emergencia de la plántula en los tratamientos mostró pérdida significativa en ambos ensayos, que fue atribuido a una ligeramente alta salinidad del lodo, que generalmente inhibe el crecimiento de las plantas, y la lenta mineralización del lodo que afecta la absorción de nutrientes.

Ninguna de las concentraciones de los elementos As, Hg, Pb, Cd y Cr, en el lodo, en el suelo antes y después de la fertilización, y en la planta de maíz excedieron los valores límites exigidos por las normas de aplicación agrícola del lodo – USEPA 40 CFR Part 503, a excepción del Pb y Cr al final de la fertilización en ambos ensayos, aunque sin producir toxicidad a la planta. Estos valores fueron evaluados estadísticamente a través de la media y la desviación estándar, aplicando la técnica Univariate del *Statistical Analysis System Software - SAS* vs 8.

El estudio demostró que el lodo seco y el lodo compostado pueden ser beneficiosamente aprovechados a bajas tasas para producir bioabono, proporcionando una solución a largo plazo sostenible de la gestión de la disposición final de los residuos sólidos.

**Palabras clave:** lodos de PTAR, metales pesados en lodos, aprovechamiento agrícola, diseño experimental, variable agronómico, Norma Técnica 40 CFR Part 503.

## POTENTIAL USE IN AGRICULTURE OF SEWAGE SLUDGE FROM PUENTE PIEDRA'S WASTE WATER TREATMENT PLANT - LIMA

### ABSTRACT

Previous tests of fertilization in pots under greenhouse conditions applied in several rates of sewage sludge generated in Puente Piedra's wastewater treatment plant were conducted with the objective to evaluate the potential agricultural use. Completely randomized design – DCA

---

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Callao. Av. Juan Pablo II 306, Bellavista Callao. Casilla Postal 138, Perú. jennyfra042004@gmail.com

<sup>b</sup> Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Universidad César Vallejo, Lima – Perú.

<sup>c</sup> Dpto. de Suelo, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú.

was applied. The analysis of variance of the average – ANVA, and Tukey comparison test ( $p < 0,05$ ) to evaluate the agronomic variables such as the number of emerging seedlings (s), stem length (H), stem thickness (D) and dry matter ( $F_d$ ) of maize as indicator plant, were used with this statistic method. Test N° 1 contained dry sludge in rates 0, 2, 4, 6, 8 and 10% mixed with washed sand, whereas, test N° 2 contained composted sludge in rates 0, 25, 50, 75 and 100% mixed with washed sand. Also control with NPK inorganic fertilizer (300-400-200) ppm in both tests. Highly significant difference of the measured variables, at higher rates of dried or composted sewage sludge respectively was observed. The emergency showed died of seedlings in both assays. It was attributed to slightly higher salinity of sludge, because it generally inhibits the normal growth of seedlings. Moreover, the slowly mineralization processes in sludge affected the nutrients uptake by plants.

The heavy metals concentrations, As, Hg, Pb, Cd and Cr, in sewage sludge, in the soil before and after fertilization and the plant, were evaluated through mean statistic and standard deviation using the Univariate Technic SAS v8. None of the metal concentration in soil, except Pb and Cr after fertilization, in both tests, exceeded comparable with concentration limits make land application of sludge identified by Title 40CFR Part 503.

The study demonstrates that dry sewage sludge and composted sewage sludge can be beneficially reused at low rates to produce biosolid providing a long-term sustainable waste management solution for final deposition.

**Key words:** sludge of PTAR, heavy metals in sludge, agricultural use, experimental design, bio-statistical analysis, agronomic variable.

## INTRODUCCIÓN

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR Puente Piedra, Lima - Perú, cuenta con la tecnología de lodos activados y con el sistema *Sequencing Batch Reactor*.<sup>1</sup> Actualmente, se genera una carga potencial de lodos residuales en exceso, constituyendo una creciente preocupación su disposición final, así como los costos económicos y ambientales debido a sus componentes tóxicos como es el contenido de metales pesados. Actualmente, en el país no se cuenta con una norma técnica que determine la aplicabilidad de estos residuos, y están clasificados como residuos de instalaciones o actividades especiales determinándose su disposición final en un relleno sanitario.<sup>2</sup> Aunque, existe un solo reglamento que establece su aplicabilidad como acondicionador de suelos por el contenido de nutrientes que posee.<sup>3</sup>

Sin embargo, EE UU de Norteamérica y la Comunidad Económica Europea han legislado diversos límites permisibles de metales pesados para la aplicación de lodo sobre terreno agrícola en su intento por evitar la contaminación del suelo,<sup>4,5</sup> documentos que han sido la base normativa del presente trabajo de investigación, por no existir una propia en el país.

Según antecedentes, la aplicación de lodo al suelo en su forma compostada como abono o enmienda, favorece la producción agrícola y mejora la calidad del suelo,<sup>6,7,8</sup> significando una fuente de alto valor nutritivo para las plantas, permitiendo reducir su disposición final en un relleno sanitario. La toxicidad del lodo en los cultivos debido a la presencia de metales pesados, compuestos orgánicos persistentes, entre otros, constituye riesgo a la salud de las personas y los ecosistemas, particularmente el suelo y el agua. La información científica es aún escasa, aunque ya se plantea la preocupación en este aspecto.<sup>8,9,10</sup>

El propósito de este trabajo de investigación es determinar el aprovechamiento agrícola del lodo de la PTAR Puente Piedra evaluando la toxicidad de los elementos As, Hg, Pb, Cd y Cr, presentes en el lodo seco y lodo compostado del suelo antes y después de la fertilización y en la parte aérea de la planta indicadora de maíz, y su influencia en las variables agronómicas de emergencia, altura, grosor y materia seca de la parte aérea de la planta indicadora.

El presente trabajo de investigación tiene el carácter de novedoso en el Perú, y es la primera realizada en lodos procedentes de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de lodos activados con el sistema *Sequencing Batch Reactor* (SBR). El incremento de plantas de tratamiento de aguas residuales que se proyectan instalar en el país y el impacto de los lodos que se producirá requiere documentarse, evaluarse y legislarse.

### PARTE EXPERIMENTAL

Los ensayos experimentales se realizaron en la Estación de Invernadero de Fertilidad de Suelo de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina - Lima, entre enero de 2007 y enero de 2008, a escala de laboratorio con la fertilización del lodo procedente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Puente Piedra. La temperatura promedio del ambiente durante la fase experimental fue mínimo 14,7°C y máximo 25,3°C, y la humedad relativa entre 71% y 91%. (Estación meteorológica Von Humboldt – UNALM).

Se realizaron 2 muestreos de lodo seco desde la cancha de secado de lodos de la PTAR (05-02-2007 y 13-03-2007), previa homogenización y se analizaron metales: cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), mercurio (Hg) y arsénico (As), aplicándose los métodos analíticos de espectrofotometría; los análisis microbiológicos: *E. coli*, Salmonella y parásitos. Se utilizó arena fina (obtenida de la cancha de acumulación de arena de la UNALM) para la mezcla con lodo (lodo seco, o lodo compostado) en los tratamientos, analizándose los mismos metales, pH y CE, para asegurar la fertilización de la planta.

En el ensayo N° 1, el lodo seco se utilizó directamente a los tratamientos. En tanto, en el ensayo N° 2, se utilizó lodo previamente compostado por un tiempo de 8 meses aprox. (técnica Indore) pasando luego por una molienda para uniformizar las partículas antes de su aplicación en los tratamientos.

Todos los tratamientos estuvieron a las mismas condiciones de temperatura y ambiente, y recibieron riego a capacidad de campo y mesa con protección contra aves. Se aplicó el diseño experimental completamente al azar, en macetas de 4 kg y por triplicado en ambos ensayos. La dosis de lodo seco y de lodo compostado aplicados en los ensayos N° 1 y N° 2 respectivamente, se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Descripción de la formulación de los ensayos experimentales

Tto.	Ensayo N° 1		Ensayo N° 2	
1-T	Testigo	(0%)	Testigo	(0%)
2-T	0,08 kg lodo	(2%)	1,0 kg lodo	(25%)
3-T	0,16 kg lodo	(4%)	2,0 kg lodo	(50%)
4-T	0,24 kg lodo	(6%)	3,0 kg lodo	(75%)
5-T	0,32 kg lodo	(8%)	4,0 kg lodo	(100%)
6-T	0,40 kg lodo	(10%)	- - -	
7-T	Fertilizante NPK	(0%)	Fertilizante NPK	(0%)
	300-400-200 (sin lodo)		300-400-200 (sin lodo)	

Fuente: Elaboración propia (2007). ppm: partes por millón (concentración de nutrientes)

Ensayo N° 1, contiene lodo seco en la mezcla con arena.

Ensayo N° 2, contiene lodo compostado en la mezcla con arena.

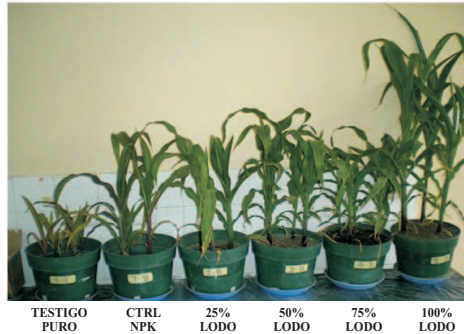
Los resultados de las concentraciones de metales se evaluaron a través de la media  $\bar{X}$  y la desviación estándar DS, de la estadística básica aplicando la técnica Univariate; las mediciones de las variables biométricas de la planta indicadora de maíz en ambos ensayos (figuras 1 y 2): altura (H, m), grosor (D, cm) materia seca (g) y el número de plantas emergentes que crecieron hasta los 60 días, se evaluaron aplicando el análisis de la varianza – ANVA y el Test de Tukey con  $p < 0,05$  de comparación de promedios. Se utilizó el software *Statistical Analysis Software – SAS v8*.

Ensayo N°1



**Figura 1.** Altura de la planta a los 60 días del ensayo con lodo seco.

Ensayo N° 2



**Figura 2.** Altura de la planta a los 60 días del ensayo con lodo compostado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la caracterización de las 02 muestras de lodo, del compost producido y de la arena utilizada en las mezclas de los tratamientos, se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2.** Características del lodo y compost de los lodos y arena empleados

Parámetro	Lodo 1 5-2-2007	Lodo 2 12-3-2007	Compost de lodo	Arena fina <sup>15</sup> 6-2-2007	USEPA 40CFR Part 503
Fisicoquímicos <sup>(1)</sup>					
pH	6,97	6,82	7,86	7,38	
CE (mS/cm)	4,69	3,65	0,33	0,51	
Materia Orgánica (g/100g)	41,94	61,55			
Densidad (kg/l)		0,756			
Humedad (g/100g)		8,22			
Metales pesados (mg/kg) <sup>(2)</sup>					
Arsénico (As)	16,00	11,40	42,10	24,08	75
Mercurio (Hg)	0,725	0,81	0,540	0,050	57
Plomo (Pb)	49,6	48,49	0,37	8,60	840
Cadmio (Cd)	< 2,00	< 2,00	6,75	< 2,00	85
Cromo (Cr)	12,4	22,59	20,00	38,68	3 000

*sigue en la pag 78 ...*

...viene de la pag. 78

Análisis microbiológicos (NMP/g) <sup>(3)</sup>		
CF	14*10	>160 000
Salmonella sp	6	>1 600
Análisis parasitológico (Nº/g) <sup>(4)</sup>		
Giardia lamblia (quistes)	2	
Uncinaria (huevos)	1	
Uncinaria (larvas)	4	132

<sup>1), (2)</sup>: Laboratorio de División Ambiental CERPER S.A.

<sup>(3), (4)</sup>: Laboratorio de Control de Calidad de Alimentos y Aguas. Fac. Ciencias Biológicas, UNMSM

mg/kg : miligramos de metal por kilogramo de muestra

NMP/g : número más probable de microorganismos por gramo de muestra

Nº/g : número de huevos de nematodos por gramo de muestra

El pH del lodo está dentro del rango normal y no afecta las condiciones de vida del suelo y el crecimiento de la planta, y la CE indicó que era un material entre ligeramente hasta muy ligeramente salino y se aceptó para su aplicación al suelo.<sup>3,7,11</sup> El contenido de materia orgánica considerado bueno, es mayor al 35% recomendado por la EPA.<sup>7</sup> El contenido de metales es menor que el límite máximo permisible de metales en lodos que se disponen al suelo de las normas técnicas,<sup>4,5</sup> sin riesgo de toxicidad para las plantas. El análisis microbiológico y de parásito lo califica como lodo clase B.<sup>4,6,12</sup>

El contenido en mg/kg de As, Hg, Pb, Cd y Cr en el suelo al inicio y final de la fertilización y en la planta de maíz (60 días de la siembra o momento del corte) de los tratamientos T1 (testigo puro), T4 (6% lodo) y T7 (control NPK) del ensayo N° 1, se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3.** Contenido de As, Hg, Pb, Cd y Cr en suelo y planta (mg kg<sup>-1</sup> peso seco) - Ensayo N° 1

Metal	Suelo inicio de la fertilización			Final de la fertilización Suelo			Foliar		
	T1	T4	T7	T1	T4	T7	T1	T4	T7
As	24,08	15,09	14,68	10,99	4,464	13,39	1,2	2,09	2,34
Hg	0,05	0,1179	0,0572	0,0583	0,0592	< 0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Pb	8,6	9,7	< 5,0	19,18	< 5,0	< 5,0	3,15	0	4,21
Cd	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 1,0	0	< 1,0
Cr	38,68	12,62	16,47	24,97	12,28	20,48	4,94	0	2,68

Fuente: Datos de Laboratorio. CERPER S.A.2007 y 2008

Los resultados mostraron que el valor más alto de As se presentó en T1 al inicio del ensayo, con tendencia al rango crítico de concentración establecido en la norma técnica. La planta mostró valores dentro de los rangos normales, aunque con tendencia al valor crítico.<sup>9,10,11</sup> En

tanto, el Hg presentó el valor más alto en T4 en suelo al inicio del ensayo, aunque dentro del rango normal, y la planta presentó valores dentro del rango normal y sin riesgo de toxicidad. Para el Pb, T1 presentó aumento del valor al final del ensayo, aunque todos los valores estuvieron dentro del rango normal, y la planta sin riesgo de toxicidad. Los valores del Cd estuvieron dentro de los rangos normales durante todo el ensayo y sin riesgo de toxicidad para la planta. Para el Cr, T1 presentó el valor más alto y T4 el valor más bajo, en T7 se observa aumento de la concentración al final del ensayo, aunque todos los valores estuvieron dentro del rango normal, en la planta los valores estuvieron en el rango normal, aunque con ligera tendencia hacia el valor crítico, y T7 muestra ausencia de cromo en la planta. Existen algunas evidencias de toxicidad moderada por metales pesados.<sup>9,8,11,12,13</sup>

La tabla 4 muestra el contenido en mg kg<sup>-1</sup> de As, Hg, Pb, Cd y Cr en el suelo al inicio y final de la fertilización y en la planta de maíz 60 días después de la siembra (momento del corte) de los tratamientos T1 (testigo), T5 (100% lodo compostado) y T7 (control NPK) del ensayo N° 2.

**Tabla 4.** Contenido de As, Hg, Pb, Cd y Cr en suelo y planta (mg kg<sup>-1</sup> peso seco) - Ensayo N° 2

Metal	Suelo inicio de la fertilización			Suelo final de la fertilización			Foliar		
	T1	T5	T7	T1	T5	T7	T1	T5	T7
As	24,08	42,10	14,68	10,99	22,97	11,37	0,08351	0,9055	0,9143
Hg	0,05	0,54	0,0572	0,0583	0,6791	0,0398	0,0391	0,0393	0,039
Pb	8,60	0,37	< 5,00	19,18	69,52	10,19	2,945	1,944	3,482
Cd	< 2,00	6,75	< 2,00	< 2,00	< 2,0	< 2,0	< 1,00	< 1,0	< 1,00
Cr	38,68	20,00	38,68	24,97	45,85	21,27	15,35	9,023	7,785

Fuente: Datos de Laboratorio. CERPER S.A.2007 y 2008

T5 (100% lodo compostado) presentó valores altos para As y Hg en el suelo al inicio y final del ensayo, con tendencia al rango crítico, aunque sin riesgo de toxicidad para la planta. El Pb en suelo de todos tratamientos aumentó al final del ensayo, siendo mayor en T5, aunque todos estuvieron dentro del rango normal exigido por la norma técnica y sin riesgo de toxicidad para la planta. Sin embargo, el Cr en el suelo al final del ensayo, aumentó su valor en T7 y T5, siendo este último el más elevado y en el rango crítico de concentración, nivel en el cual se puede producir toxicidad y ocasionar el 10% de depresión en el campo.<sup>8,9,12,13</sup> En cuanto al Cd, se observó un contenido dentro del rango normal en suelo y planta.

**Tabla 5.** Resultados de la estadística de los metales pesados en suelo y planta de maíz

Metal en suelo y planta	Ensayo N° 1		Concentración normal	Ensayo N° 2		
	$\bar{X}$	DS		$\bar{X}$	DS	
As	suelo inicial	17,95	5,31269	0,10 - 40	26,95	13,934
	suelo final	9,61	4,6192	0,10 - 40	15,11	6,809
	Planta (aérea)	1,88	0,5992	0,02 - 7	0,634	0,477
Hg	suelo inicial	0,75	0,0373	0,01 - 0,5	0,216	0,2808
	suelo final	0,525	0,0108	0,01 - 0,5	0,259	0,3638
	Planta (aérea)	0,02	0,00	0,005 - 0,17	0,0391	0,000
Pb	suelo inicial	7,77	2,458	2,0 - 300	4,66	4,1257
	suelo final	9,727	8,1868	2,0 - 300	32,96	31,976
	Planta (aérea)	2,45	2,1898	0,2 - 20	2,79	0,7806
Cd	suelo inicial	2,0	0,0	0,01 - 2,0	3,6	3
	suelo final	2,0	0,0	0,01 - 2,0	2,0	0
	Planta (aérea)	0,67	0,577	0,10 - 2,4	1,0	0
Cr	suelo inicial	22,59	14,067	5,0 - 1500	32,45	10,785
	suelo final	19,24	6,435	5,0 - 1500	30,70	13,253
	Planta (aérea)	2,54	2,473	0,03 - 14	10,72	4,059

Leyenda:  $\bar{X}$ : media o valor promedio de los datos de metales totales (mg/kg PS)

DS : Desviación Estándar.

suelo inicial: es el suelo antes de la fertilización

suelo final: es el suelo después de la fertilización.

Planta (aérea): toda la planta desde la superficie del suelo.

En la tabla 5 se presenta el análisis estadístico de la Media y la Desviación Estándar de la data obtenida en la evaluación de metales de los ensayos N° 1 y N° 2. Los resultados de la media y la desviación estándar mostraron dispersión normal de los datos en el ensayo N° 1, excepto el Pb y Cr, que mostraron ligera dispersión debido al comportamiento variable de los metales presentes en los materiales estudiados. Análogamente, el ensayo N° 2 presentó este comportamiento de dispersión de los datos muy variable para todos los metales evaluados, excepto el Cd, que mostró homogeneidad de los resultados. Los valores del Pb y del Cr presentaron los mayores alejamientos con respecto a la media y la desviación estándar con alta dispersión. No se determinó que factor o factores influyeron en este comportamiento de los metales evaluados.



**Tabla 6.** Análisis estadístico de las variables biométricas del maíz en el Ensayo N° 1

Medición	Altura (cm)		Grosor, (cm)	Emerge (semillas)		Materia seca (g)
	26 días	60 días	60 días	26 días	60 días	60 días
ANVA	**	**	**	**	**	**
Coef.Var.	11,9%	38,59%	56,67%	19,78%	28,06%	33,85%
Prueba	2 (62,6) A	4 (98,23) A	4 (1,67) BA	7 (6) A	7 (6) A	7 (45,67) A
Tukey	7 (59,1) A	3 (96,44) A	3 (1,23) BA	1 (5,67) BA	1 (5,97) A	4 (41,33) A
	3 (57,1) A	2 (86,80) A	7 (0,98) BA	2 (5,33) BA	2 (5,33) A	2 (39,0) A
	4 (33,8) B	7 (84,77) A	2 (0,91) BA	4 (5,0) BA	3 (5) A	3 (38,0) A
	1 (32,0) B	1 (41,14) BA	5 (0,64) B	3 (5,0) BA	4 (4) A	1 (12,33) A
	5 (25,8) B	5 (32,67) BA	1 (0,28) B	6 (3,33) B	5 (0,67) B	5 (10,67) B
	6 (11,4) C	6 (0) B	6 (0) B	5 (3,33) B	6 (0) B	6 (0,0) C

(\*): Significativa;(\*\*): altamente significativa; ANVA: análisis de variancia; CV: coeficiente de variabilidad  
Los valores con la misma letra no son significativamente diferentes.

La tabla 6 muestra el análisis estadístico de la data obtenida de las variables biométricas de la planta indicadora de maíz, en el ensayo N° 1.

**Altura de planta.**- El ANVA mostró diferencia altamente significativa con un buen grado de confiabilidad de los resultados, y la Prueba de Tukey determinó que T2 alcanzó la mayor altura promedio a los 30 días de la siembra, seguido por T7 y T3. Posteriormente, a los 60 días T4 presentó la mayor altura promedio, seguida por T3, T2 y T7, en ese orden. Se observó que, excepto T7, un mayor tiempo de contacto lodo-maíz favoreció su crecimiento, comprobándose la acción fertilizante del lodo. T1 mostró características de planta raquítica. En T6 se observó 100% pérdida de las plántulas antes de finalizar el ensayo. T5 presentó una sola planta con 98 cm de altura al final del ensayo. Se sabe que la planta sufre el efecto de un lento grado de transformación (mineralización) producido por las mayores dosis de lodo afectando en su crecimiento y desarrollo. Este proceso requiere la evaluación de la estabilidad del lodo antes de su aplicación.

**Grosor del tallo.**- el ANVA mostró evidencia significativa de la diferencia entre los promedios de la variable en los tratamientos, y la Prueba de Tukey presentó a T4 con el mayor grosor promedio, luego T3, T7 y T2, en ese orden, sin diferencia significativa. T5 presentó el menor grosor promedio (la única planta tenía 1,91 cm de grosor). T1 mostró el menor grosor. Se observó que la mayor dosis de lodo favoreció al aumento del grosor de la planta, lo que indica la disponibilidad de los nutrientes en el lodo.

**Emergencia de las semillas de maíz**<sup>13</sup>. - T7 presentó el número total de 6 semillas de maíz sembradas hasta el final del ensayo,; T1 mostró 17% de pérdidas; T5 con 89% fallas, y T6 con 100% fallas. No se evaluaron más factores para determinar las pérdidas. Se sabe que esta característica se presenta en un lodo inmaduro y poco estabilizado.<sup>6</sup>

**Materia seca.**- estadísticamente, T7 registró el mayor peso promedio en peso seco de la planta, seguido por los T4, T2 y T3, en ese orden, sin diferencia significativa entre ellos. En tanto, T1 y T5 mostraron el menor promedio de la variable. Este resultado mostró una buena



asimilación de los nutrientes por parte de las plantas, aunque T7 mostró alta eficiencia. La mayor acumulación de materia seca en el maíz es influida por el nivel de fertilidad y disponibilidad de nitrógeno, elemento asimilable adecuado del suelo y factor limitante más común de las plantas, y un suministro deficiente puede provocar descensos notables en la producción vegetal.<sup>6</sup>

**Tabla 7.** Análisis estadístico de las variables biométricas del maíz en el Ensayo N° 2

Medición	Altura (cm)		Grosor, (cm)		Emerge (semillas)	Materia seca (g)
	37 días	60 días	37 días	60 días	37=60, días	60 días
ANVA	**	**	**	**	**	**
Coef.Var.	14,59%	7,37%	22,36%	13,82%	34,02%	17,31%
Prueba	5 (77,0) A	4 (142,67) A	5 (1,37) BA	5 (2,07) A	7 (4,68) A	5 (129,67) A
Tukey	2 (62,17)A	3 (137,33) A	2 (1,14) BA	3 (1,98) BA	1 (4,0) A	4 (62,67) B
	7 (60,5) BA	5 (135,33) A	3 (1,02) BA	4 (1,85) BA	4 (3,67) A	3 (45,33) B
	3 (60,8) BA	2 (123,68) A	7 (0,94) BA	2 (1,51) BA	5 (3,67) A	7 (38,0) B
	4 (51,8) BC	7 (87,0) B	4 (0,85) B	7 (1,21) BA	2 (3,0) A	2 (42,33) B
	1 (35,17) B	1 (46,0) C	1 (0,47) B	1 (0,63) B	3 (3,0) A	1 (9,67) C

(\*): Significativa; (\*\*): altamente significativa; ANVA: análisis de variancia; CV: coeficiente de variabilidad. Los valores con la misma letra no son significativamente diferentes.

La tabla 7 muestra el análisis estadístico de la data obtenida de las variables biométricas de la planta indicadora de maíz, en el ensayo N° 2.

**Altura de planta.**- El estadístico ANVA mostró diferencia altamente significativa entre los tratamientos, y de acuerdo con la Prueba de Tukey. T5 logró la mayor altura promedio a los 30 días, siguen T2, T7 y T3 en ese orden sin diferencia significativa entre ellos. A los 60 días, la mayor altura promedio lo logró T4, seguido por T3, T5 y T2 en ese orden. T7 y T1 mostraron valores más bajos para la variable evaluada. Se observó que el lodo compostado favoreció el crecimiento de la planta. El lodo compostado presenta una alta disponibilidad de nutrientes, los que se descomponen y mineralizan en forma rápida y fácilmente en el suelo, pudiendo proporcionar grandes cantidades de N y P para el uso inmediato por las plantas.<sup>7</sup>

**Grosor del tallo.**- el ANVA mostró diferencia altamente significativa de la variable evaluada. A los 60 días de la siembra, T5 alcanzó el mayor valor de la variable espesor del tallo, seguido por T3, T4 y T2, en ese orden y sin diferencia significativa entre ellos; T7 mostró diferencia significativa con respecto a los anteriores; T1 mostró el menor valor. Considerando la dosis de lodo compostado. Al final del ensayo se observó para los espesores el orden siguiente:

$$LC\ 100\% > LC\ 50\% > LC\ 75\% > LC\ 25\% > NPK$$

El ensayo mostró que el compostaje permite un buen proceso de mineralización de la materia orgánica contenida en el lodo, favoreciendo la disponibilidad de los nutrientes aprovechables por las plantas comparado con el fertilizante NPK.

**Emergencia de las semillas de maíz**<sup>13</sup>. - Los valores de la variable emergencia a los 30 y 60 días mostraron igual cantidad de plantas en T7 y T1 sin dosis de lodo compostado. T7 presentó la mayor cantidad de plantas favorecidas por el fertilizante, T1 mostró buena germinación y emergencia, aunque no favoreció al crecimiento de la planta.

**Materia seca**. - alta diferencia estadística en los tratamientos, se observó T5 con el mayor peso seco promedio (parte aérea) seguido por T4, T3, T7 y T2. T1 registró el valor más bajo de peso seco promedio. El nivel de fertilidad del suelo y disponibilidad de nutrientes influye en la adecuada acumulación de materia seca del maíz.<sup>7</sup> El compost es una fuente de nutriente disponible para la absorción de elementos nutritivos, que además de hacer crecer más a las plantas, le proporciona mayor peso seco.<sup>6</sup>

### CONCLUSIONES

- La evaluación de los ensayos preliminares realizados determinaron que el lodo generado en la planta de tratamiento de aguas residuales de Puente Piedra cumple las exigencias sanitarias y ambientales permitiendo su utilización con fines agrícolas.
- La caracterización del lodo mostró los parámetros analizados en los rangos normales, la concentración de Hg, Pb, Cd, Cr y As en suelo antes y después de la fertilización y en la planta indicadora de maíz estuvieron dentro de los rangos normales de la norma técnica de aplicación de lodo en suelo US-EPA Part 503 y la Directiva 86/278/EEC, excepto el Cr que mostró incremento en el suelo al final del ensayo, y valor en el rango crítico y con riesgo de toxicidad para la planta.
- Los resultados de las variables biométricas de la planta indicadora de maíz del Ensayo N° 1, mostraron diferencias significativas a bajas tasas de contenido de lodo seco, 2%, 4% y 6% inclusive. En tanto, en el Ensayo N° 2, la diferencia altamente significativa se observó en la dosis de 100% lodo compostado. Mayores dosis de lodo seco en los tratamientos del Ensayo N° 1 afectaron el crecimiento y desarrollo de la planta indicadora disminuyendo los valores de sus variables agronómicas. Este hecho también fue observado por otras investigaciones<sup>6</sup> que recomiendan tomar en cuenta la estabilización del lodo previo a su incorporación al suelo.
- La evaluación estadística aplicada mostró que el lodo seco y el lodo compostado presentan diferencias significativas comparadas con los controles. Aunque el lodo compostado es la forma de aplicación más favorable proporcionando los resultados más significativos en el crecimiento del cultivo, se tiene que verificar la presencia de metales y el riesgo de toxicidad.
- El suelo arenoso fertilizado con lodo o lodo compostado permite implementar nuevas áreas forestales en suelos arenosos.

### AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen las contribuciones oportunas de los siguientes profesionales investigadores: Dra. Adriana Carrasco (Chile), Dr. Abdul Ghani Liew Abdullah (Malasya), Ing. Omelio León (Cuba), Ing. Luis Carrasco V., Ing. Sonia Aranibar T., Bach. Olga Andrade L., Ing. Ronald Huertas, Blg. Sofia Basilio.

**BIBLIOGRAFÍA**

1. Sedapal. Planta de tratamiento de aguas residuales. ([http://www.sedapal.com.pe/erdf/resumen\\_df.htm](http://www.sedapal.com.pe/erdf/resumen_df.htm), (último acceso Octubre 2006).
2. Ley General de Residuos Sólidos. Ley N° 27314. Normas Legales del Diario oficial El Peruano, 21-07-2000. Año XVIII–N° 7333, pp. 190739-190748.
3. Reglamento Nacional de Construcciones NORMA S.090. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Vice-Ministerio de Vivienda y Construcción. 1997. Lima-Perú.
4. U.S.E.P.A., United States- Environmental Protection Agency 625/10-84-003. Standard for the use or disposal of sewage sludge. 40CFR Part 503.
5. Directiva 86/278/CEE de 12/06/86. Directiva del Consejo de la UE sobre límites máximo permisibles de metales pesados en lodos que se disponen al suelo. 2001.
6. Alva, E. Estudio del empleo del humus de lombriz con fines agrícolas, procedentes de lodos residuales de depuradora en Cajamarca. [Tesis de Maestría] UNALM – Lima Perú; 1999.
7. Falcón, E. Producción de compost a partir de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales Covicorti de SEDALIB S.A. Trujillo. [Tesis de grado]. UNALM, Lima Perú; 2005.
8. Castillo, G.; Duran, A.; Ahumada, I.; Mendoza, J. & Carrasco, A. Evaluación de toxicidad de lodos de aguas servidas. Simposio Residuos Orgánicos y su uso en sistemas agroforestales. XXV Jornadas Chilenas de Química. 2007.
9. Alloway, B. Heavy metals in soil. U. of London. John Wiley & Sons, Inc. 1993. p. 83-235.
10. Granato, T. & Col. Trace element concentrations in soil, corn leaves, and grain after cessation of biosolids applications. J. Environmental Quality. Vol.33 part 6, pág 2078–2089. *American Society of Agronomy* 2004.
11. Fassbender, H.; Bornemisza, E. Introducción a la química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Monografía N° 25. OEA. 1982.
12. EPA 832-F-00-064. Biosolids Technology Fact Sheet. Office of Water Washington, D.C. EPA-United States Environmental Protection Agency. 2000.  
[http://www.epa.gov/owm/mtb/cs\\_00\\_064.pdf](http://www.epa.gov/owm/mtb/cs_00_064.pdf) (último acceso, diciembre 2007).
13. Mendoza, J.; Garrido, T. & Castillo, G. Aplicación de biosólidos al suelo toxicidad y efecto sobre la movilidad y biodisponibilidad de metales pesados. Simposio Residuos Orgánicos y su uso en sistemas agroforestales. Boletín N° 20. 2004. ISSN 0716-6192.
14. Miralles, R.; Beltrán, E.; Porcel, M.; Delgado, M. Emergencia de seis cultivos tratados con lodo fresco y compostado, de estaciones depuradoras. Rev. Int. Contaminación Ambiental. 2002, 18 (3) 139-146. España.  
<http://www.editoraperu.com.pe> (último acceso Agosto 2008).
15. Universidad Nacional Agraria La Molina. Informe de análisis especial en suelo - Tabla de interpretación. Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes. (2007).