

**UNIVERSIDAD METROPOLITANA
ESCUELA GRADUADA DE ASUNTOS AMBIENTALES
SAN JUAN, PUERTO RICO**

**MANEJO DE LODOS RESIDUALES Y PULPA DE CAFÉ
PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL**

Requisito parcial para la obtención del
Grado de Maestría en Ciencias en Gerencia Ambiental
en Manejo y Evaluación de Riesgo

Por
Gloryann Moreno Soto

13 de mayo de 2008

DEDICATORIA

*A mis padres el Dr. Víctor M. Moreno Maldonado,
la Lic. Anilda Soto Díaz, y a mi hermano Víctor M. Moreno Soto,
que tanto apoyo me han brindado en toda mi vida,
y en especial durante estos años de tanto esfuerzo .
A ti, mi futuro esposo Alejandro Carrasquillo López
por siempre creer en mi y darme el entusiasmo que muchas veces
me hace falta para seguir luchando contra las adversidades. Gracias a todos por
acompañarme en mis ideales y metas de ofrecer soluciones prácticas
a los problemas de contaminación de nuestro país.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por guiarme y permitirme alcanzar académicamente una meta más. A todas y cada una de las personas que de una forma u otra pusieron un granito de arena para que siguiera adelante y culminara la investigación.

Al comité de trabajo compuesto por el Dr. Nefalí García, Sr. Carlos Trigueros y el Dr. Joaquín A. Chong por haberme dado su apoyo para cumplir con este requisito tan importante para mi vida profesional. A la Autoridad de Desperdicios Sólidos, en especial a la Sra. Lisbi Pagán y la Sra. Margarita Dijols por la ayuda técnica científica que me brindaron. Al Agrónomo Luis A. Pérez por su ayuda incondicional y su apoyo técnico.

A Víctor León Soto por su apoyo y asistencia en la preparación de las tablas, las figuras y la edición del documento. A todas las personas que formaron parte del desarrollo de este trabajo y que en algún momento fueron motivo de inspiración para mí.

A todos les agradezco infinitamente su valiosa ayuda.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE APÉNDICES.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO I : INTRODUCCIÓN.....	1
Problema de estudio.....	5
Justificación	6
Preguntas de Investigación	7
Meta	7
Objetivos.....	8
CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA.....	9
Trasfondo histórico	9
Composta	9
Vermicomposta.....	11
Lodos Residuales (Industriales).....	11
Operación de la planta de tratamiento de la industria “X”	12
Descripción de la Planta de Tratamiento	13
SRS en Puerto Rico.....	14
Pulpa del Café.....	17
Marco Conceptual o Teórico	19
Proceso de producción de composta.....	19
Papel de las lombrices en el vermicomposteo	21
Estudio de Casos.....	23
Marco Legal.....	27
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	36
Área de estudio	36
Periodo del estudio.....	39
Fuente de Datos.....	39
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
Introducción	43
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55

Introducción	55
Conclusiones	55
Recomendaciones	58
Limitaciones del estudio	59
LITERATURA CITADA	61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Costos operacionales de disposición de lodo de la industria “X”	66
Tabla 2. Costos de desvío de lodo hacia composta por la industria “X”.	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Gráfica generación de lodo de la AAA para los años 2004 a 2006.	69
Figura 2.	Gráfica generación de lodo de la industria “X” para los años 2005 a 2007.	70
Figura 3.	Gráfica métodos de disposición de lodos residuales generados por la AAA.....	71
Figura 4.	Gráfica producción estimada de pulpa de café en Puerto Rico para los años 2004 a 2006.....	72
Figura 5.	Fotos del proceso de compostaje en la Estación Experimental Agrícola de Adjuntas.	73
Figura 6.	Fotos del proceso de vermicomposta en la Estación Experimental Agrícola de Adjuntas.	74
Figura 7.	Foto de la pulpa del café en la Estación Experimental Agrícola de Adjuntas, Beneficiado y Charca de Lixiviado en vertedero	75

LISTA DE APÉNDICES

- Apéndice 1. Producción estimada de Pulpa de Café en Puerto Rico durante las cosechas 2003-2006. (Provisto por el Departamento de Agricultura de Puerto Rico).
- Apéndice 2. Resultados de estudio de tiempo útil para varios Sistemas de Relleno Sanitario en Puerto Rico. (Provisto por la Autoridad de Desperdicios Sólidos).
- Apéndice 3. Costos Operacionales de Plantas de Composta en Puerto Rico. (Provisto por la Autoridad de Desperdicios Sólidos)
- Apéndice 4. 503 Annual Report- (2004, 2005 and 2006). Amount of Sludge Generated to the Disposal Method. (Provisto por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados).
- Apéndice 5. Resultados de laboratorios realizados al lodo de la industria “X”.
- Apéndice 6. Full RCRA realizado al lodo de la industria “X”.

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

AAA	Autoridad de Acueductos y Alcantarillados
ADS	Autoridad de Desperdicios Sólidos
⁰ C	Grados Celsius
CAA	Acta de Aire Limpio
Ca	Calcio
CFR	Código de Reglamentos Federales
CH ₄	Metano
cm	Centímetro
CO ₂	Bióxido de Carbono
CWA	Acta de Agua Limpia
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
ELA	Estado Libre Asociado
EPA	Agencia de Protección Ambiental
⁰ F	Grados Fahrenheit
Gpd	Galones por día
H ₂ O	Agua
JCA	Junta de Calidad Ambiental
K	Potasio
Mg	Magnesio
MBR	Reactor de Membrana Biológica

mg/l	Miligramos por litro
mS/cm	Electro conductividad
NAAQS	National Ambient Air Quality Standard
NO ₂	Bióxido de Nitrógeno
O ₃	Ozono
P	Fósforo
Pb	Plomo
pH	Potencial de Hidrógeno
PM	Materia Particulada
%	Por Ciento
RMDSNP	Reglamento para el Manejo de Desperdicios Sólidos No Peligrosos
SO ₂	Bioxido de Sulfuro
SRS	Sistema de Relleno Sanitario
SST	Sólidos Suspendidos Totales
VOC's	Compuestos Orgánicos Volátiles (por sus siglas en inglés)
WM	Waste Management
Yds	yardas

RESUMEN

En este estudio examinamos los peligros ambientales relacionados a la generación y manejo inapropiado de lodo residual industrial y pulpa de café en Puerto Rico. Evaluamos la viabilidad económica de la producción de composta y vermicomposta a partir de la combinación de pulpa de café y lodos residuales industriales para reducir la disposición de lodos con alto contenido orgánico en los vertederos. Al igual que evaluamos los peligros de la disposición de lodos residuales en vertederos en Puerto Rico, lo que nos ayudó a identificar ciertos beneficios ambientales de la producción de composta. Determinamos que la producción de composta y vermicomposta con pulpa de café y lodo residual industrial es recomendable en términos ambientales y económicos. Y que las cantidades de pulpa de café generada en las cosechas son suficientes para producir composta. Este método de desvío reduce la disposición de residuos orgánicos del lodo de plantas de tratamiento en vertederos. De esta forma se reduce la generación de metano y lixiviados, aumenta el tiempo útil de los vertederos, y mejora el uso de los suelos y la calidad del agua.

ABSTRACT

This study evaluated the environmental risks related to the inappropriate management and generation of industrial sludge and coffee pulp in Puerto Rico. We evaluated the economic viability for the production of compost and vermicompost using the combination of coffee pulp and industrial sludge to reduce the disposal of sludge in landfills. As we examined the hazards of sludge disposal in landfills at Puerto Rico, we identified the environmental benefits of composting. We determined that the production of compost and vermicompost with industrial sludge and coffee pulp is recommended in an environmental and economic way. And the coffee pulp quantities generated in the production of coffee is enough for the compost production. This diversion method reduces the disposal of organic wastes such as sludge in landfills. A reduction in methane and leachate generation, extending the time span of landfills and improving soil and water quality.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Trasfondo del problema

Al igual que en muchos otros países, la generación de desperdicios sólidos ha representado una gran preocupación para el gobierno de Puerto Rico (PR) por los últimos años, Rohena (2001). El pobre manejo de los desperdicios sólidos causa daños significativos al ambiente y a la salud humana por lo que la generación, control, rehuso y disposición de los mismos ha sido motivo de estudio y preocupación a través de los años.

Cabe señalar que el aumento en la generación, acumulación y disposición de desperdicios sólidos es un problema que se agrava desde el periodo de la Revolución Industrial, para mediados del siglo XIX. Según Rohena (2001), los factores que han llevado a un aumento en la generación de éstos son: el aumento de la población, el crecimiento económico, la tecnología de empaque y la cultura. Este incremento se observa en muchos países, debido al crecimiento industrial que, según muchos, explica el incremento en la generación de desperdicios sólidos con el aumento en bienes materiales.

En PR no ha habido un desarrollo apropiado de estrategias y tecnologías de manejo de desperdicios paralelo con el crecimiento industrial y adquisición de bienes materiales. Por tal razón, el tiempo útil de los vertederos ha disminuido en forma considerable. Para el año 1994, existían sesenta y dos vertederos en operación. Las enmiendas a la parte 257 del 40 Código de Reglamentos Federales (CFR, por sus siglas en inglés) promulgadas bajo el Subtítulo D de la Ley para la Conservación y Recuperación de los Recursos de 1976 (RCRA, por sus siglas en inglés) fueron establecidas para el manejo apropiado de los desperdicios sólidos. Bajo la parte 258 del

40 CFR, y el Reglamento para el Manejo de los Desperdicios Sólidos No-Peligrosos (RMDSNP) de la Junta de Calidad Ambiental (JCA), y la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) en coordinación con la JCA, decidieron ordenar el cierre de treinta y tres vertederos que no cumplieran con los criterios establecidos en la reglamentación antes mencionada. Para el año 2004, el número de vertederos en operación era treinta y dos, y se espera que este número se reduzca a once para el año 2015 (ADS, 2004).

Según indica Rohena (2001) y cito: “Puerto Rico no cuenta con la capacidad territorial para establecer nuevas tecnologías de infraestructura que requieran una gran cabida. Puerto Rico debe tomar una decisión respecto al manejo de los desperdicios sólidos porque si no la basura arrojará la isla”, se cierra la cita. El problema seguirá presente debido al aumento poblacional y de consumo de mercancías, lo que hace más difícil resolver el problema. Según establece la Ley Num. 416 de 22 de septiembre de 2004, según enmendada, es necesario mantener armonía entre el humano y el resto de la naturaleza. Debemos pues, evaluar y considerar otros tipos de infraestructura para el manejo de los desperdicios sólidos que sean apropiados desde el punto de vista ambiental.

Las industrias pueden manejar los desperdicios de forma variada. El manejo de lodos residuales se lleva a cabo a través de la disposición en los vertederos. No obstante, existen diferentes alternativas para el manejo de éstos a través del proceso de compostaje y/o vermicompostaje. La composta es un proceso de descomposición de materia orgánica de una manera controlada en forma aeróbica o anaeróbica. El material orgánico compostado, también conocido como ‘humus’, puede ser utilizado como fertilizante,

acondicionador de terreno en la agricultura, control de erosión, y biorremediación de terrenos, como resultado de la descomposición biológica controlada. Según se indica en “Recycled Organic Units” (2002) y cito: “Vermicomposta envuelve la estabilización de orgánicos compostables bajo condiciones controladas por especies particulares de lombrices”, se cierra la cita. El compostaje se considera reciclaje ya que es un proceso por el cual se recupera la materia orgánica de los residuos sólidos y es transformada en un material de grandes beneficios para el medio ambiente.

Cleves (1998) indica que los desechos industriales estacionales como los del café, presentan un problema que es difícil de resolver, por su costo, ya que se requiere proveer equipo e instalaciones para tratar los grandes volúmenes que se pueden producir para unos pocos meses del año. En algunos países lo que agrava la situación es que coincida el periodo de recolección con la estación seca, cuando los ríos tienen su menor caudal, lo que produce un efecto dañino en las corrientes receptoras. En Puerto Rico el periodo de recolección coincide con la estación de lluvia. Según Cleves (1998) y cito, “El aumento continuo del volumen de la cosecha, y el desarrollo urbano alrededor de las plantas de beneficio; son factores que agravan la situación y justifican la urgente búsqueda de soluciones”, se cierra la cita. En otras palabras, un pobre manejo del almacenamiento y disposición de la pulpa puede resultar en la contaminación de aguas superficiales o subterráneas lo cual afecta algún cuerpo de agua aledaño y produce un efecto grave en los sistemas acuáticos.

Según Roa M. (1999), la pulpa del café en su forma simple puede ser utilizada para la producción de abono orgánico o como alimento animal de buena calidad. Esta no es un material tóxico; por el contrario, es un producto orgánico que manejado de forma

apropiada puede representar un alto valor agregado para el caficultor. No obstante, si la pulpa es manejada de forma ineficiente, esta puede convertirse en un contaminante. La contaminación que produce la pulpa se debe a que parte de la materia orgánica se disuelve o queda en suspensión en las aguas, en las diferentes etapas del transporte y del beneficio. En un proceso natural de oxidación, el material orgánico en el agua puede conllevar la reducción del oxígeno disuelto. La probabilidad de contaminación del agua como resultado de un pobre manejo de la pulpa del café es muy alta debido a su alto contenido orgánico. Cuando se dispone de la pulpa en una finca esta pasa por un proceso anaerobio en el que se producen compuestos orgánicos volátiles y metano, esto estimula la contaminación del aire, agua y suelos.

Los lodos, el mosto, los cienos son el resultado del proceso biológico de tratamiento, que están compuestos de materia orgánica, en este caso células y material inerte a una concentración de 1.5 por ciento de sólidos. Existen diferentes tipos de lodos. Por ejemplo, los lodos de residuos de la industria de alimentos, contienen una mezcla de residuos de alimentos, de limpieza (food grade) y utilidades. Otro ejemplo son, los lodos de residuos industriales, los cuales contienen una mezcla de productos industriales, de limpieza y utilidades. Tanto los residuos industriales provenientes de la industria de alimentos como los de la industria en general pueden contener residuos químicos provenientes de sus procesos. Con respecto a los residuos sanitarios, estos contienen una mezcla de productos de origen sanitario, de limpieza, y de descargas industriales o comerciales, que pueden por ende contener organismos patógenos.

Problema de estudio

En Puerto Rico existe escasez de terrenos para la disposición de desperdicios. El pobre manejo de éstos causa: alteración de su descomposición, gases con olores nauseabundos, generación de lixiviado, aumento en la emanación de metano, agrava el problema de calentamiento global, y problemas de contaminación de agua. Existe además falta de disponibilidad de espacio en instalaciones y terrenos donde se lleva a cabo el despulpamiento de cáscara de café. Más aún, en este caso se desperdicia un recurso potencial que puede ser utilizado de diversas formas.

Las industrias de bebidas carbonatadas disponen de sus lodos residuales en ciertos vertederos. Una de estas industrias, que de ahora en adelante denominaré “X”, por razones de privacidad, genera un promedio aproximado de 108.3 yardas cúbicas (yd³) al mes. En el 2006 hubo una disposición total de lodo residual de 1,300 yd³. La industria “X” ha desarrollado una iniciativa de evaluar opciones para el manejo de sus lodos residuales, tales como: producción de composta, vermicomposta, alimento para animales y cubierta diaria en los vertederos.

Los lodos de “X” contienen una mezcla de residuos de los productos, una cantidad mínima de residuos de limpieza y de residuos del área de utilidades. Se han medido características de éstos tales como: nitrógeno orgánico (N), nitrógeno total (TKN), fósforo (P), potasio (K), azufre (S), calcio (Ca), magnesio(Mg), sodio (Na), hierro (Fe) y sales solubles, entre otros (ver apéndice 5).

El Dr. Joaquín A. Chong, investigador de la Estación Experimental Agrícola (EEA), localizada en el municipio de Adjuntas, logró compostar lodos residuales de la industria “X” en proporción de 1:2 con pulpa del café, respectivamente. Los resultados

obtenidos mostraron que es viable el compostaje del material orgánico del lodo así como de la pulpa de café. Datos de electro-conductividad (mS/cm) demostraron que la cantidad de sales son altas y que se requeriría la reducción de éstas para poder utilizar este sustrato (composta) para crecer plantas ornamentales. En otras palabras, una vez reducidas las sales, las plantas ornamentales pueden crecer favorablemente en este material compostado. Así mismo el Dr. Chong demostró que el lodo puede ser vermicompostado hasta una proporción máxima de 25% lodo y 75% pulpa de café ya que un aumento en lodo produjo un aumento en mortalidad de lombrices. (Comunicación personal sobre resultados de investigación que será publicado por el Dr. Chong).

Este estudio va dirigido a evaluar el manejo de lodos residuales industriales en Puerto Rico para el desarrollo de estrategias que reduzcan la contaminación ambiental, reduzcan la disposición de desperdicios orgánicos en los vertederos y aumenten el tiempo útil de estos. De igual forma, incluye la evaluación del uso de composta a partir de la combinación de pulpa del café y lodo residual industrial como alternativa para reducir la disposición de desperdicios orgánicos en los vertederos.

Justificación

El volumen de los desperdicios sigue aumentando. Es urgente buscar opciones para reducir los desperdicios que se depositan en los vertederos del país ya que el tiempo útil de éstos va en continuo descenso. Desde la aprobación de la Ley de Reciclaje, no se ha logrado la efectividad esperada. Si se lograra reducir la disposición de lodos residuales industriales en los vertederos, se lograría aumentar el tiempo útil de los mismos y así contribuir a un mejor manejo del riesgo ambiental que producen estos desperdicios. Los lodos residuales industriales de industrias como las de bebidas carbonatadas, contienen

un por ciento aproximado de humedad de 76.4 (industria “X”). Esto produce un efecto adverso al ambiente ya que su disposición en los vertederos aumenta la generación de lixiviados. Esto pudiera afectar, tanto el subsuelo como los recursos acuáticos aledaños. Es de suma importancia identificar y reconocer los impactos que causan estos lodos en el ambiente. Resultados de este estudio pueden dar base para utilizar otras estrategias de manejo de lodo residual industrial, y otros tipos de lodos como los de plantas de tratamiento de aguas usadas de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA).

Preguntas de Investigación

1. ¿Es viable la producción de composta y vermicomposta a partir de la combinación de pulpa de café y lodo residual industrial para reducir la disposición de lodos con alto contenido orgánico en los vertederos?
2. ¿Cuál es el peligro potencial de la disposición de lodos residuales en los vertederos en Puerto Rico?

Meta

Desarrollar estrategias para reducir la contaminación ambiental en los vertederos, los cuerpos de agua aledaños y aumentar el tiempo útil de estos. Evaluar la posible reducción en disposición de lodos residuales a través del uso de composta y vermicomposta a partir de la combinación de la pulpa de café y lodos residuales industriales.

Objetivos

1. Estudiar la viabilidad de la producción de composta y vermicomposta a partir de la combinación de pulpa de café y lodos residuales como los de la industria “X” para reducir la disposición de lodos con alto contenido orgánico en los vertederos y pulpa de café en lugares inapropiados.
2. Determinar el peligro de la disposición de lodos residuales y pulpa de café sobre los cuerpos de agua para identificar los beneficios ambientales de la producción de composta.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

Trasfondo histórico

Composta

La composta es un material utilizado para mejorar las características del suelo. Se forma, cuando con la humedad, el aire y el calor, la materia orgánica se descompone, dando lugar a una sustancia parecida a la tierra. La composta es un material útil para el acondicionamiento del terreno obtenido a través de la transformación bioquímica de un sustrato orgánico, mediante un proceso natural o que es controlado dentro de límites predeterminados. Se cree que la producción continua de composta fue desarrollada por Sir. Albert Howard, (Ploeg, 1999). Este fue el primero en experimentar con el modo de prepararla en Indiana, antes de la Primera Guerra Mundial. Según la Autoridad de Desperdicios Sólidos (ADS) éste desarrolló el método de capas o estratos de material, convirtiéndose en el proceso normal para elaborar composta.

La composta natural existe desde que hay plantas verdes sobre la tierra. Cualquier vegetal que caiga al suelo y se descomponga de forma aerobia (con la utilización de oxígeno como parte del proceso de descomposición) por bacterias y otros organismos se convierte en composta. Esta se elabora con materia orgánica o biodegradable. “El compostaje es una de las estrategias más deseables para mantener los desperdicios sólidos fuera de los vertederos” (Powelson, 1992). En este proceso donde la materia orgánica se descompone se produce un suplemento para el suelo con alto contenido de nutrientes.

Según Bhattacharyya (2003) y Doran y Parking (1994), la materia orgánica es un atributo importante en la calidad de los suelos.

Los beneficios que se pueden obtener de la composta según la ADS son:

- Es útil para reducir, reutilizar y reciclar los residuos orgánicos.
- Se devuelve material valioso a la naturaleza.
- Ayuda a aumentar la fertilidad del suelo y a mejorar el crecimiento de las plantas.
- Reduce el uso del espacio en sistemas de relleno sanitario.
- Disminuye la utilización de fertilizantes químicos sintéticos.
- Aumenta la capacidad de los suelos para retener agua y nutrientes y reduce la compactación y erosión.
- No mata la flora bacteriana del suelo como ocurre con algunos abonos inorgánicos, de tan amplio uso.

La conversión a composta de desechos que contienen materia orgánica permite usar, residuos de jardinería, cieno de las plantas de tratamiento, papel y materiales putrescibles, entre otros (Tyler, 1998). En el proceso de descomposición, invertebrados como los insectos, lombrices y micro-organismos como las bacterias termofílicas y hongos termofílicos ayudan a la transformación del material en composta (Composter Forum, 2001).

Vermicomposta

La vermicomposta resulta de un proceso de descomposición de materia orgánica en la presencia y con la participación de lombrices. Estas son animales invertebrados del tipo anélidos, o sea, gusanos segmentados, que transforman los residuos orgánicos en un subproducto estable denominado vermicomposta. Son hermafroditas y depositan sus huevos protegidos en una cápsula llamada cocón. Se conocen entre 6 y 7 mil especies diferentes de lombrices. Una de estas es la *Lumbricus terrestris* (lombriz de tierra), la cual se alimenta de la materia orgánica descompuesta presente en los suelos. En estado adulto llega a medir entre 9 y 30 centímetros (cm) de largo. Su apareamiento se produce por lo general cuando se asoman a comer a la superficie. La puesta de huevos se realiza a razón de un cocón por animal cada 45 a 60 días y su periodo de vida es de 4 a 5 años (Hashemimajd, 2004). No todas las especies son aptas para la cría; la mayoría, requiere condiciones muy precisas y difíciles de lograr. Sin embargo la que mejor se ha adaptado al cautiverio es la lombriz californiana, (*Eisenia foetida*).

Lodos Residuales (Industriales)

Los compuestos orgánicos son sustancias químicas en la forma de cadenas de carbono e hidrógeno. En muchos casos contienen oxígeno, nitrógeno, azufre, fósforo, boro y halógenos. Las moléculas orgánicas pueden ser de dos tipos:

- Naturales: Son sintetizadas por los seres vivos, y se llaman biomoléculas. Estas son estudiadas por métodos como la bioquímica.
- Sintéticas: Son sustancias que no existen en la naturaleza y han sido producidas por los humanos, un ejemplo de estas son los plásticos.

Por lo general, los compuestos orgánicos tienen enlaces de carbono y de hidrógeno; los compuestos inorgánicos, no los poseen.

Los lodos tienen múltiples usos. Entre ellos se destaca su aplicación a los suelos como una de las formas de su disposición final. Esta actividad ha sido realizada con éxito durante décadas (O'Kelly, 2005). El interés en la aplicación de los lodos al suelo ha aumentado en los últimos años como consecuencia de la menor disponibilidad y viabilidad de otras opciones tales como la disposición en vertederos controlados (SRS), la combustión y la disposición en el mar. Los lodos se pueden aplicar en terrenos de uso agrícola, forestal, marginales y en particular en aquellos preparados para su disposición o manejo apropiado (O'Kelly, 2005).

Operación de la planta de tratamiento de la industria "X"

Esta planta es del tipo Reactor Biológico de Membrana (MBRs, por sus siglas en inglés) que tiene un reactor biológico y ultrafiltración. Este sistema permite la separación del fango y el líquido mediante membranas, obteniendo ventajas importantes frente a la separación en los tradicionales decantadores secundarios.

El agua del reactor biológico es filtrada pasando a través de las paredes de una membrana, debido a una pequeña diferencia en presión producida por una bomba centrífuga. El agua filtrada es extraída del sistema mientras el fango y los compuestos de tamaño superior a los poros de la membrana quedan retenidos y algunas retornan al reactor biológico.

Este ciclo se alterna con un corto contralavado, en el que se invierte el sentido del flujo para forzar el paso del agua filtrada desde el interior al exterior de la membrana para limpiarla.

El Reactor Biológico de Membrana está compuesto por dos partes principales:

- Reactor biológico: responsable de la degradación de los compuestos presentes en el agua residual.
- Módulo de membranas, para llevar a cabo la separación física del licor de mezcla.

Además, estos sistemas pueden adoptar dos configuraciones básicas:

- Membranas sumergidas o sistema sumergido: Las membranas se sitúan dentro del propio reactor biológico, eliminando la necesidad de bombeo y aprovechando la agitación mecánica de la aireación.
- Membranas externas o sistema de bucle externo: El contenido del reactor biológico se bombea al módulo de membranas. Las ventajas de este modelo residen en que el propio módulo de membranas sirve de contenedor de limpieza para las mismas y se evita su manipulación mecánica.

Descripción de la Planta de Tratamiento

La capacidad de la planta es de 72,000 galones por día (gpd) de flujo promedio, 121,000 gpd de flujo pico, 19 gramos por litro (g/l) de Demanda Química de Oxígeno (DQO), y 50 mg/l de Sólidos Suspendidos Totales (SST). En el 2007, se reusaba 70% del agua tratada en torres de enfriamiento, calderas, irrigación y control de polvo fugitivo. Las concentraciones de los reactores pueden llegar a 30,000mg/l. El método de centrifugación es utilizado para controlar las concentraciones en los bioreactores.

SRS en Puerto Rico

La generación y disposición de desperdicios sólidos en Puerto Rico ha ido aumentando debido al crecimiento económico y poblacional (Rohena, 2001). La agenda del futuro para la ADS es el desarrollo de nuevas tecnologías que promuevan la reducción en la fuente, el reciclaje y el procesamiento de los desperdicios que no pueden ser reciclados. De esta forma se reduce la necesidad de grandes extensiones de terreno para disponer los desperdicios sólidos.

En su mayoría los lodos son dispuestos en los vertederos o utilizados en la agricultura y la restauración del terreno. Para un manejo efectivo los lodos deben secarse, lo cual permite aumentar su porcentaje de sólido. Según O'Kelly (2005), los beneficios de secar el lodo son notables ya que minimizan los posibles peligros ambientales al aumentar la estabilidad de los vertederos (suelos) y controla la generación de lixiviados y biogas. De igual forma maximiza la capacidad de almacenamiento y aumenta el tiempo de operación de un SRS. La capacidad de almacenamiento de un vertedero se optimiza al compactar el lodo para maximizar su densidad (in situ) lo que extiende el tiempo útil de los vertederos.

Generación de lixiviados en los vertederos

La disposición de lodos residuales sanitarios e industriales en un vertedero aumenta la producción de lixiviados por su alto contenido de humedad. Las características físicas de los lixiviados son: iones de metales y compuestos químicos, estos podrían tener un viso de aceite en la superficie (The Minnesota Pollution Agency, 1994).

Las características químicas de los lixiviados son: altas concentraciones de iones inorgánicos, sulfato, cloruro y compuestos orgánicos volátiles (VOC's), al igual que una

variedad de iones de metales como, arsénico, cadmio, cromo y plomo. Los lixiviados están compuestos por contaminantes orgánicos e inorgánicos. Esto como resultado de la descomposición de los desperdicios en los vertederos. Según Chian y de Walle (1997), la materia orgánica en los vertederos fluctúa de compuestos pequeños, ácidos volátiles con masa molecular baja a compuestos grandes, ácidos fúlvicos y húmicos de masa molecular de intermedia a alta, esta puede ser biodegradada a lixiviados.

La calidad física y química de los lixiviados en los vertederos depende de la composición y profundidad de los desperdicios sólidos, la disponibilidad de humedad y oxígeno, el diseño y la operación del vertedero y de la edad de los desperdicios (Reinhart & Grosh, 1998). Los lixiviados migran a lo largo del camino de menor resistencia en el vertedero. Estos pueden migrar a la superficie del terreno si hay infiltración en las faldas de los promontorios o en la base de la pendiente.

Una vez los lixiviados llegan al fondo del vertedero o a la barrera impermeable, estos fluyen lateralmente o se mueven por la base del vertedero hasta llegar a las formaciones del subsuelo. Si el vertedero no tiene un sistema de recolección de lixiviados, estos se moverán debajo del relleno y es posible que encuentren al sistema de aguas subterráneas. Dependiendo de las formaciones geológicas debajo del relleno, los lixiviados pueden ser una fuente de contaminación para un acuífero cercano al vertedero (Robinson, 1986).

El principal problema que ocasiona el depósito de los residuos urbanos en los vertederos es el hecho de que pueden presentar, un grave riesgo de contaminación de las aguas subterráneas de la zona (Herráez et al., 2001). La contaminación del agua subterránea puede ocurrir cuando el lixiviado se mueve a través de los desperdicios y los

terrenos cercanos donde forma un frente contaminante. El frente se mueve en la dirección en la cual el agua fluye. El agua contaminada puede tener repercusiones negativas en las fuentes de agua doméstica, agrícolas, comerciales, recreativas e industriales (The Minnesota Pollution Agency, 1996), al igual que causa daños en ríos, quebradas y a animales.

En Puerto Rico, hay treinta y dos vertederos en operación, de los cuales sólo veinte están en el programa de Operación Cumplimiento de ADS y por lo tanto califican para que se le otorguen fondos de esta agencia.

En el año 2007, la EPA emitió una orden de cierre para cinco (5) vertederos en Puerto Rico que no están en cumplimiento con los requisitos establecidos. Estos son: Santa Isabel, Vega Baja, Toa Baja, Florida y Aguadilla. La ADS ha desarrollado el Nuevo Itinerario Dinámico que establecerá cuáles son los vertederos a los que se les permitirá la expansión. En este se recomienda la expansión de seis vertederos, a saber: Ponce, Yauco, Juncos, Humacao, Salinas y Fajardo. Además, recomienda la construcción de un nuevo vertedero en Peñuelas, donde podrá haber disposición de desperdicios industriales. Este Itinerario fue presentado en vista pública con el propósito de convertirlo en Política Pública para Puerto Rico. Estas vistas públicas se llevaron a cabo los días 11, 15, 16 y 18 de enero de 2008.

Con este itinerario la ADS ha establecido una jerarquía para el manejo de los desperdicios con el propósito de reducir la disposición de desperdicios sólidos en vertederos. Esta jerarquía sigue el orden: reusar, reducir, reciclar, tecnologías de conversión a energía y disposición en vertederos.

Para el 2025 se espera que en Puerto Rico estén en operación las siguientes tecnologías para el manejo de los desperdicios sólidos (Conversación extensa con Margarita Dijols, ADS). Estas son:

- Siete Sistemas de Relleno Sanitario
- Dos Plantas de Conversión de Energía
- Dos Plantas de Composta
- Dos Estaciones Traslado

Es requerido que se desarrollen estrategias viables en términos económicos y ambientales seguras que resulten en la disminución del volumen de desperdicios sólidos que llegan a los vertederos.

Pulpa del Café

Existen varias versiones sobre la introducción del café a Puerto Rico. En *Historia de Puerto Rico* Salvador Brau, (2004), le atribuye el inicio del cultivo a las “exhortaciones” del gobierno dirigido por Ramírez de Estenós hacia 1755, quien ya había conocido sus ventajas comerciales en Cuba. Sin embargo, sin identificar la fuente, Cayetano Coll y Toste en el Boletín Histórico de Puerto Rico Tomo I, apuntó que el café llegó procedente de Santo Domingo en 1736.

La operación de despulpamiento desgarrar el fruto para sacar la semilla del café, separar los granos de la cáscara conocido como epicarpio y parte del mucílago conocido como mesocarpio que las cubre, Moscoso, F. (1999). Para llevarlo a cabo, se hace uso de máquinas llamadas despulpadoras o pulperos que son de discos cilíndricos. El grano de

café es desgarrado al pasar a través de los discos giratorios que presentan protuberancias y un elemento fijo y liso o acanalado llamado pechero.

Esta operación es delicada porque la semilla queda expuesta a cualquier ataque microbiano y penetración de sustancias indeseables o formación de manchas que redundarán en el deterioro del sabor de la bebida que se prepare. La operación se hace en una corriente de agua. Esta etapa no elimina por completo el mesocarpo, por lo que queda parte del mucílago adherido a los pergaminos. Se recomienda que las despulpadoras utilicen siempre agua limpia, y dar un apropiado mantenimiento de limpieza a éstas, ya que los restos del mucílago, ricos en carbohidratos, son fuente fácil de contaminación microbiana que se transmitiría al producto dañándolo.

Las zonas ideales para cultivar el café son aquellas ubicadas en la región tropical, exceptuando aquellos extremos montañosos que por su altitud alcance el punto de congelación. La altura es un factor importante que determina la calidad del café. A mayor altura mayor calidad del producto. La elevación sobre el nivel del mar a la que mejor crece el cafeto esta entre los 500 y 6,000 pies. En Puerto Rico crece bien entre los 500 y 3000 pies.

Los suelos de la región montañosa de Puerto Rico reúnen los requisitos necesarios para el desarrollo de este cultivo. Los suelos apropiados son los que tienen un pH entre 5.5 y 6.5, fértiles, profundos, con buen desagüe, ligeramente pesados y con una retención adecuada del agua.

El proceso del café genera tres subproductos, entre los cuales se encuentran, la pulpa, el mucílago y el pergamino. La pulpa presenta una gran variedad de alternativas para ser recicladas, por ejemplo:

- La transformación de la misma en vermicomposta por medio de lombrices.
- Su utilización en la elaboración de abonos orgánicos fermentados.
- Su uso en la elaboración de aboneras o composteras.
- Su aprovechamiento como sustrato para la reproducción biológica, lo que es deseable para obtener abonos orgánicos de muy buena calidad.

Suárez de Castro (1960) indica que 100 libras de pulpa de café seca equivalen, con base en su composición química, a 10 libras de fertilizante inorgánico. Este subproducto contiene una alta cantidad de potasio para ser utilizado como abono, en particular en aquellos cultivos como siembras de plátano y guineo, que tienen necesidades elevadas de este elemento.

Marco Conceptual o Teórico

Proceso de producción de composta

La descomposición de los residuos orgánicos es un proceso que toma tiempo. Otros mecanismos de humificación, como la producción de composta pueden acelerar este proceso. La conversión de la materia orgánica fresca a sustratos, con alto grado de descomposición, es realizada en un período de tiempo corto (pocos meses). Durante este proceso, los residuos orgánicos se descomponen bajo la acción de diversos microorganismos y factores ambientales. Los productos principales son bióxido de carbono (CO₂), agua (H₂O), iones minerales y materia orgánica estabilizada, rica en sustancias húmicas que reciben el nombre de humus (Atiyeh et al., 2000a; Soto y Muñoz, 2002; Pereira y Zezzi-Arruda, 2003).

En este proceso la materia orgánica es utilizada por microorganismos aerobios como sustrato de crecimiento, pues estos son organismos heterótrofos que demandan compuestos orgánicos para su ciclo de vida (Trewavas, 2004). Es un método muy antiguo que consiste en mezclar desechos vegetales, animales, ceniza, minerales proporcionándoles humedad, aireación y temperatura favorables para la actividad de los microorganismos capaces de convertir esos materiales en compuestos orgánicos estabilizados.

Las materias primas utilizadas en la producción de composta provenientes de una amplia gama de residuos orgánicos tales como los sólidos municipales, lodos de aguas usadas conocidas como sanitarias, lodos residuales industriales conocidas como aguas de proceso, residuos de jardín o verdes y estiércol, entre otros (Chafetz *et al.*, 1998).

El proceso promueve el reciclaje de los residuos orgánicos de diferentes tipos de desperdicios, para el aprovechamiento de sus componentes. El propósito es incorporarlos a su ciclo natural, a través del producto final, la composta. Esta es utilizada en ocasiones como fuente de elementos nutritivos y mejora del suelo ya que produce un aumento en materia orgánica.

El compostaje es un proceso aerobio, biológico, termofílico de degradación y de estabilización de materia orgánica, bajo condiciones controladas. Durante este proceso ciertos sustratos de materia orgánica tales como azúcares, aminoácidos, lípidos y celulosa, son descompuestos, en poco tiempo por bacterias, hongos y actinomiceto mesófilos tolerantes a temperaturas medias. La proporción de esos microorganismos varía según el sustrato. Luego se lleva a cabo la descomposición de los materiales más recalcitrantes o reacios, tales como: hemicelulosa y lignina (Hoitink y Changa, 2004) por

organismos termófilos (resistentes a altas temperaturas) como las levaduras y algunos actinomicetos. Durante la fase termofílica estas altas temperaturas (45 – 65 °C), causan la muerte de patógenos y semillas de malezas evitando que sean transferidos a cultivos sucesivos. Se pasa luego a la formación de sustancias húmicas, durante la fase de enfriamiento y maduración.

Como resultado del proceso de producción de composta, los residuos orgánicos son reciclados en productos que pueden ser aplicados en los suelos como una fuente de materia orgánica bastante seca y con olor a tierra.

Papel de las lombrices en el vermicompostaje

Para facilitar la descomposición y estabilización de los residuos orgánicos, diversos investigadores han optado por utilizar otro proceso biológico, el cual no incluye la etapa termofílica, sino que incluye el empleo de lombrices de tierra, el cual recibe el nombre de “vermicomposteo” o “vermicomposta” (Atiyeh *et al.*, 2000a).

La *Eisenia foetidia* son consumidores voraces de residuos orgánicos. Son utilizadas para el vermicomposteo ya que no tienden a escapar del área donde ocurre el proceso. Estas sólo utilizan una pequeña porción para la síntesis de sus cuerpos y excretan una gran parte de los residuos consumidos en una forma con digestión parcial. Los intestinos de las lombrices contienen una gran cantidad de microorganismos, enzimas y hormonas, entre otros. Éstos materiales son descompuestos rápido y son transformados a vermicomposta (Ghosh *et al.*, 1999).

Durante el proceso de alimentación, las lombrices fragmentan los residuos, incrementan la actividad microbiana y los índices de descomposición o mineralización de los residuos orgánicos. Alteran las propiedades físicas y químicas de los materiales,

provocando un efecto de composteo o humificación mediante el cual la materia orgánica inestable es oxidada y estabilizada. El producto final, llamado vermicomposta es obtenido conforme los residuos orgánicos pasan a través del intestino de la lombriz (Atiyeh *et al.*, 2000a).

Mientras los microorganismos son responsables de la degradación bioquímica de la materia orgánica en el proceso de producción de vermicomposta, las lombrices son importantes para acondicionar el sustrato y para promover la actividad microbiana. Al transportarse o moverse las lombrices, éstas desintegran el material orgánico, incrementan el área superficial expuesta a los microorganismos y mueven los fragmentos y los excrementos ricos en bacterias, y se homogeniza el material orgánico (Domínguez *et al.*, 2003). La actividad de las lombrices en el proceso de vermicomposta es una física, mecánica y bioquímica. Los procesos mecánicos incluyen: aireación del sustrato, mezclado y molienda. El proceso bioquímico es llevado a cabo por la descomposición microbiana del sustrato en el intestino de las lombrices (Buck *et al.*, 2000). También a diferencia del tradicional tratamiento microbiano de los residuos (composta), la producción de vermicomposta provoca la bioconversión de los desechos en dos productos de utilidad: la biomasa de la lombriz y la vermicomposta (Ghosh *et al.*, 1999; Ndgewa *et al.*, 2000; Domínguez *et al.*, 2001).

Al aplicar lombrices a los residuos orgánicos se acelera la descomposición y mineralización de la materia orgánica, generando un medio más apropiado para el crecimiento y cultivo de plantas (Atiyeh *et al.*, 2000b). La utilización de lombrices de tierra en la descomposición de residuos orgánicos, tales como lodos de aguas usadas,

desechos de animales, residuos de cultivos, y residuos industriales, para generar vermicomposta se ha ido incrementado (Atiyeh *et al.*, 2002).

Estudio de Casos

Caso Número 1: “Controlled Composting in Developing Countries”, (2001)

El rechazo a la disposición inapropiada de desperdicios sólidos ha impulsado un movimiento hacia soluciones nuevas y seguras en términos ambientalmente seguras. Entre éstas está el desarrollo de plantas de producción de composta. La Universidad de Vicosa, Brazil ha puntualizado en cuatro grupos principales para apoyo y comunicación, en la creación de una planta de composta. Estos grupos son: comunidad local, gobierno e instalaciones federales, autoridades locales, asociaciones locales y organizaciones gubernamentales. Auditorias de los desperdicios sólidos en países en desarrollo han demostrado que la composición de estos desperdicios es: 50-70%: es materia orgánica rechazada, 5-15%: es material reciclable y 30-40%: es desperdicio inerte.

Construir una planta de composta con una capacidad de procesamiento de 15 toneladas métricas por día, toma alrededor de 50 a 60 días laborables. Este estudio de caso describe una planta de reciclaje y compostaje construida en Coimbra, Brazil. Los residuos sólidos producidos en esta ciudad consisten de desperdicios residenciales y comerciales, materiales vegetativos, residuos farmacéuticos y centros médicos.

Antes de la construcción de la planta de compostaje los vertederos contaminaban un pequeño río como resultado de una percolación constante de lixiviado. Este río era utilizado por animales para consumir agua y para regar cultivos. Se presumió que las aguas subterráneas estaban contaminadas de igual forma, ya que este vertedero estuvo abierto durante seis años, previo a la construcción de la planta.

La planta fue construida para trabajar a una capacidad máxima de 15 toneladas métricas por día, pero procesó un promedio de 3 toneladas métricas por día. El trabajo de campo práctico realizado por la Universidad de Vicosa ha demostrado que el programa de manejo de desperdicios sólidos integrado es capaz de minimizar y en un futuro cercano sobrepasar los siguientes problemas: baja fertilidad de los suelos, problemas de salud por contaminación de desperdicios sólidos y desempleo por varias crisis sociales. Los resultados establecen que la ciudad está limpia y la comunidad local puede disfrutar de los beneficios obtenidos en términos de calidad ambiental que incluye la salud pública.

Caso Número 2: “Potencial alternative use of coffee wastes and by-products” (2005)

Existen diversas alternativas para el manejo de los desperdicios generados en la producción del café. En países productores de café, los desperdicios de estos constituyen una fuente severa de contaminación de agua. Se han realizado diversos esfuerzos para la utilización de estos desperdicios como materia prima. Según este estudio esta materia puede ser utilizada para la producción de bebidas, vinagre, biogás, cafeína, pectina, enzimas, proteínas y composta.

Los posibles usos de desperdicios del café son:

- Pulpa del café: puede reemplazar hasta un 20 por ciento la alimentación del ganado lechero; esto no representa efecto adverso alguno al ganado y produce un ahorro en costos de un 30 por ciento. El maíz puede ser reemplazado por pulpa de café deshidratada hasta un 16 por ciento de la ración total. La pulpa puede ser utilizada para la alimentación de animales tales como: cerdos, peces, conejos, pollos y corderos.

- Biogás del agua usada proveniente del desperdicio del café: El extracto de café cereza es una fuente potencial de biogás (metano). Este proceso ocurre cuando la apropiada fermentación y otros procedimientos reducen el pH y un proceso eventual de neutralización promueve la creación de bióxido de carbono (CO₂). La evolución del CO₂ estimula el desarrollo del biogás.
- Pulpa del café sólida para ensilaje: Por un proceso de deshidratación de la pulpa del café, inoculación con aditivos para ensilaje y un empaque especial, es posible la utilización de ésta para la alimentación efectiva de corderos.
- Mushrooms (cetas): Luego de fermentada y secado parcial, la pulpa del café puede ser utilizada para el cultivo de cetas exóticas. En áreas cuyo consumo se considera un alimento gourmet, para los agricultores del café esto significa un aumento significativo en su flujo de efectivo.
- Cáscara del café como combustible: Al quemar la cáscara en un productor de gas, y correr el motor del mismo se produce electricidad. Implica que este proceso puede ser utilizado para secar la pulpa del café en mayor cantidad.
- Pulpa del café sólida como composta: Se establece que el mover o girar las pilas de pulpa de café en un periodo consecutivo de días promoverá su transformación hacia composta. El volumen original de pulpa se reducirá en el proceso. El punto en el cual la temperatura de la pila aumenta por

segunda ocasión, se produce el colapso de la estructura y una liberación de un líquido negro se produce. Este líquido contiene la mayor cantidad de nutrientes y fertilizantes.

Caso Número 3: PML-021 Mayor Productividad y Rentabilidad con Producción Más Limpia de la Compañía Industrial Agrícola Café Nueva Esperanza Núñez S.R.L. (CIACNEN)

Según este estudio la producción más limpia es, “la aplicación continua de una estrategia ambiental, preventiva e integrada, a los procesos productivos, a los productos y a los servicios para incrementar la eficiencia global y reducir riesgos para los humanos y el ambiente general. Esta puede ser aplicada a los procesos empleados en cualquier industria, a los productos mismos y a los diferentes servicios prestados en una sociedad”.

Se identificó un ciclo de producción limpia que al llevarse a cabo tendría efectos benéficos sobre el ambiente que incluye la salud humana, a saber:

- Identificar oportunidades y formular recomendaciones; este primer paso nos permite identificar las deficiencias u oportunidades de mejoramiento en cada operación. Es de suma importancia que esta tarea sea ejercida por personas especializadas en cada operación, desde un obrero hasta un ejecutivo.
- Implantar las recomendaciones; se debe llevar a cabo en orden de prioridad o intereses de la empresa. Para realizar los cambios o mejoras se debe formar un grupo de trabajo.
- Medir el éxito; ocurre mediante indicadores tales como: “la reducción en la cantidad de desechos o de contaminación generada; la reducción en el

consumo específico de materias primas, energía y agua; la reducción de costos de producción; y el incremento de las ganancias.

Al utilizar este ciclo de producción se observaron cambios significativos, tales como: el aumento en rendimiento del café pergamino fue de un 10%. Al incrementar la recuperación del café a partir de café guinda se produjo una reducción de residuos sólidos en la cosecha. Separar los residuos provenientes del despulpado y desmucilaginado mecánico, causó la eliminación de los lixiviados de la pulpa por efecto de las aguas mieles y la reducción de materia orgánica a ser tratadas en éstas y eliminación de residuos de pulpa en las piscinas de tratamiento.

Marco Legal

Los requisitos legales de producción de composta y vermicomposta son:

Ley de Conservación y Recuperación de Recursos 1976 (RCRA por sus siglas en inglés)

Reglamenta y controla la generación, almacenaje, transportación, tratamiento y disposición de los desperdicios sólidos. Reglamenta los tipos de desperdicios que pueden ser depositados en los SRS y exige el pre-tratamiento de desperdicios peligrosos bajo condiciones específicas. Bajo el Subtítulo D de RCRA se reglamentan los residuos que no son peligrosos y se establece un control en cuanto al almacenamiento, la transportación, el procesamiento y la disposición de los mismos. Además, la ley define como desperdicios sólidos: la basura, desperdicios de ciertos tipos de fango, algunos líquidos, sólidos, semisólidos y material gaseoso. La ley define como sustancias peligrosas aquellas que exhiban una de las siguientes características: 1) corrosividad, 2) reactividad, 3) inflamabilidad 4) toxicidad. De igual forma establece especificaciones en cuanto al diseño, construcción y operación de instalaciones de residuos que no son

peligrosos, rastreo de aguas subterráneas, cierre, post-cierre, requisitos financieros para los SRS; y permisos de construcción y operación.

Parte 256 del Código de Reglamentos Federales Título 40, (40 CFR, por sus siglas en inglés), conocido como las Guías para el Desarrollo e Implantación de Planes Estatales para el manejo de los Residuos Sólidos (1979)

El propósito de estas guías es ayudar implantar y desarrollar el Plan de Manejo de Desperdicios Sólidos del Estado. Estas guías contienen métodos para lograr los objetivos para el manejo y disposición de los residuos sólidos peligrosos y los que no son peligrosos, además de la conservación, maximización y utilización de los recursos.

Parte 257 del 40 CFR – Criterios para la Clasificación de las instalaciones y Prácticas de Desperdicios Sólidos (1979)

Provee los criterios y clasificación de las instalaciones de disposición de desperdicios sólidos y que deberán adoptar para evitar efectos adversos al ambiente que incluye la salud.

Parte 258, 40 CFR – Criterios para Rellenos Sanitarios de Desperdicios Sólidos (1992)

El propósito de esta parte de la reglamentación es establecer los criterios de la Ley RCRA para todos los sistemas de relleno sanitario municipales (SRS), para proteger la salud humana y el ambiente general. Estos criterios aplican a los dueños y operadores de SRS existentes y expansiones laterales.

Ley de Aire Limpio (CAA, por sus siglas en inglés, 1972)

Su objetivo es proteger y mejorar la calidad de aire se implantan mediante la reglamentación de las fuentes de emanación y además controla y reduce la emanación atmosférica de algunos contaminantes de forma tal que se logre y se mantenga un grado mínimo de alteración del ambiente.

El gobierno Federal administra e implanta la ley y reglamentos a través de la EPA, pero creó un programa para delegar a las autoridades estatales la responsabilidad de prevenir y controlar la contaminación de aire. De acuerdo a esto se crea la Ley Sobre Control de Contaminación de Aire (Ley Núm. 157 de 28 de junio de 1968 según enmendada). La Junta de Calidad Ambiental tiene todos los poderes y facultades para la prevención, disminución y control de la contaminación atmosférica y emite permisos para poder construir, instalar, o establecer fuentes de contaminantes.

Existen seis contaminantes para los cuales la EPA ha establecido “National Ambient Air Quality Standards” (NAAQS, por sus siglas en inglés): a saber:

- Dióxido de azufre (SO₂);
- Materia Particulada con un tamaño menor de 2.5 micrones de diámetro (PM-2.5);
- Monóxido de carbono (CO)
- Ozono (O₃);
- Bióxido de nitrógeno (NO₂); y
- Plomo (Pb)

Este reglamento aplica a los gases que emanan por la descomposición de los desperdicios sólidos y las sustancias con olores objetables que se producen en las plantas de producción de composta.

Ley de Agua Limpia, según enmendada (CWA, por sus siglas en inglés) (1978)

La EPA desarrolló un nuevo reglamento para proteger la salud pública y el ambiente general anticipando el efecto adverso de ciertos contaminantes que podrían estar presentes en los biosólidos. Esta reglamentación se llama Norma de Uso de Disposición de Cienos de Alcantarillados Sanitarios, bajo la regla 503. En este reglamento se cambia la definición de este material de cieno de plantas de tratamiento de aguas usadas que pueden ser reciclados.

El objetivo de la ley es restaurar y mantener las características químicas, físicas y biológicas las aguas de la nación. La ley ordena que se desarrolle un plan comprensivo entre las agencias federales y los estados. Requiere que se le de la debida atención para mejorar la calidad del agua, en vista de la necesidad que existe de mantener las aguas en condiciones para proteger la vida acuática, en particular los peces y la vida silvestre, para utilizarla como agua potable, para uso agrícola e industrial, y otros propósitos. Existen varios programas bajo la ley dirigidos a fuentes directas, aguas de escorrentía, plantas de tratamiento de aguas usadas, dragado y relleno de áreas donde existe agua, control de aceites y sustancias peligrosas.

Esta regla establece el requisito para el uso y disposición final de biosólidos cuando estos son:

1. Aplicados al terreno para acondicionamiento o para fertilizar cosechas u otros cultivos de la tierra.
2. Si son depositados en la superficie de una instalación de disposición.
3. Si son sometidos a combustión.

Este reglamento incluye 5 subpartes que incluyen provisiones generales, requisitos para aplicación al terreno, disposición en la superficie, reducción de patógenos y atracción de vectores, además de combustión. Para cada uno de estos usos reglamentados se proveen límites de contaminantes, prácticas de manejo, normas de operación y requisitos de frecuencia de rastreo, registro de datos o informes. La mayor parte de estos requisitos son autos impuestos y deben ser seguidos, aun cuando no se haya emitido un permiso.

Esta ley aplica al manejo de los desperdicios sólidos en el proceso de descomposición, ya que en este proceso se producen lixiviados y las aguas nacionales podrían ser contaminadas.

Ley sobre política pública ambiental (Ley 416 del 22 de septiembre de 2004, según enmendada).

Existe una serie de estatutos que establecen la política pública del Estado Libre Asociado de Puerto Rico (ELA) concerniente al manejo de los residuos sólidos. Esta política pública es desarrollada e implantada en términos reglamentarios por la JCA y en términos operacionales por la ADS y los municipios. La ADS es la agencia en la cual se

ha delegado la función de dirigir y administrar los residuos sólidos conforme a las leyes y reglamentos de Puerto Rico y Estados Unidos de América.

La Ley sobre Política Pública Ambiental aplica al manejo de los desperdicios sólidos no peligrosos debido a que esta incluye cualquier decisión gubernamental que pueda afectar significativa la calidad del ambiente.

Ley para la Reducción y Reciclaje de Desperdicios Sólidos en Puerto Rico – Ley Num. 70 del 18 de septiembre de 1992, según enmendada

Establece como política pública del ELA el desarrollo e implantación de estrategias viables en términos económicos y ambientales, que resulten en la reducción del volumen de residuos sólidos que requieran disposición final. Como parte de las estrategias propuestas en esta ley, se considera necesario modificar las prácticas de manejo y disposición existentes para reducir la intensidad de uso de los vertederos del país. A estos fines, se utilizarán tecnologías y se implantarán sistemas para la recuperación de recursos con el potencial de ser reciclados y devueltos a la economía como productos o materia prima.

Reglamento de Desperdicios Sólidos No Peligrosos, este reglamento fue promulgado mediante la resolución, R-97-3-93

Se propone lidiar con el manejo y operación de instalaciones de desperdicios sólidos que no son peligrosos. Su propósito es establecer los requisitos necesarios para el manejo, transportación, disposición, administración y el seguimiento de las actividades relacionadas con las instalaciones de residuos sólidos que no son peligrosos. Las enmiendas mas recientes a este reglamento fueron aprobadas en diciembre de 1997, para incluir disposiciones relativas al aceite usado, neumáticos (gomas), composta y desperdicios biomédicos.

Esta ley expone en su capítulo tres las prohibiciones y requisitos generales. La Regla 531 establece que ninguna persona podrá crear o permitir la creación de un daño real o potencial a la salud humana o al ambiente general debido a la contaminación por desperdicios sólidos que no son peligrosos.

Orden Ejecutiva 2001-58A del 5 de octubre de 2001 deroga el Plan Regional de Infraestructura para el Reciclaje y Disposición de los Residuos Sólidos en Puerto Rico de 1996.

Establece como política pública la jerarquía de métodos desglosada en el Artículo 3 de la Ley Núm. 70 del 8 de septiembre de 1992. Por consiguiente la política pública del ELA es la siguiente:

- Promover la concienciación sobre el efecto que tienen nuestras acciones en el deterioro del ambiente y el beneficio asociado con la reducción, reuso, reciclaje y composta de los residuos sólidos.
- Puntualiza en el desarrollo de infraestructura, reglamentación e incentivos dirigidos a fomentar la reducción, reutilización, reciclaje y la composta en la Isla.

En este trabajo de investigación puntualizamos en los requisitos de aplicación de biosólidos al terreno. El término aplicar significa poner los biosólidos en el terreno para tomar ventaja del contenido de nutrientes y la capacidad de acondicionamiento de éstos. Los requisitos para aplicación al terreno también aplican a materiales derivados de biosólidos o que han pasado por un cambio en calidad por medio de algún tipo de tratamiento o por que se mezclaron con otros materiales. Ejemplo de estos materiales podrían ser agentes abultantes, desperdicio municipal o vegetativo. A través de varias técnicas los biosólidos pueden ser asperjados o distribuidos en la superficie del terreno. También, pueden ser inyectados debajo de la superficie de la tierra. Como los biosólidos tienen que ser tratados antes de ser aplicados al terreno su uso tiene un bajo grado de riesgo. El reglamento 503 de la EPA aplica a preparadores y aplicadores de biosólidos. El preparador es el que produce o añade materiales de biosólidos al terreno.

Los biosólidos aplicados al terreno deben cumplir con límites específicos de contaminantes. Existen normas de operación para controlar organismos que puedan generar enfermedades y para reducir la atracción de mosquitos, moscas y otros organismos capaces de transferir enfermedades. Para cada contaminante hay un límite máximo. Este límite aplica a 10 metales o metaloides pesados, entre los cuales se

encuentran: arsénico, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel, selenio y zinc. Si estos límites son excedidos los biosólidos no podrán ser aplicados al terreno hasta tanto estas condiciones disminuyan lo suficiente para estar en cumplimiento con los parámetros establecidos. Hay cuatro opciones para cumplir con los límites de contaminación. Estos son: opción de calidad excepcional, opción de concentración de contaminantes, la opción de carga acumulativa de contaminantes y la de carga de contaminante anual. Cualquiera de estas opciones es protectora de la salud y el ambiente general. Esta se logra mediante la combinación de límites y prácticas de manejo de cada opción.

Los patógenos son organismos que puedan causar enfermedades. Estos pueden ser bacterias, virus, y parásitos. Los vectores son organismos tales como roedores o insectos que pueden transportar enfermedades cargando y transfiriendo patógenos. La subparte D del reglamento 503 de la EPA hace la designación de biosólidos clase A y clase B con relación a los patógenos. Esta clasificación indica la densidad de patógenos en los biosólidos. Los requisitos para la aplicación de estos biosólidos en el terreno van a variar dependiendo de la concentración de patógenos lograda. Si los patógenos tales como salmonela, otras bacterias, virus entéricos y huevos de helmintos viables están por debajo de los límites detectables, pero a concentraciones que no incluyen la prevención de la exposición después de su uso o disposición, estos biosólidos están clasificados como clase B.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

Área de estudio

Se evaluó el manejo de lodos residuales industriales en Puerto Rico para lograr el desarrollo de estrategias que reduzcan la contaminación ambiental y aumentar el tiempo útil de los vertederos. Como parte de los procesos de investigación, realizamos visitas a la Estación Experimental Agrícola (EEA) localizada en Adjuntas, Puerto Rico. Durante las visitas, observamos el proceso que se realizó para la producción de composta y vermicomposta con pulpa de café de la EEA y lodo residual de la industria “X”. Parte de esta investigación será sustentada con los resultados de este proyecto piloto realizado por el Dr. Joaquín A. Chong de la EEA a quien se ha entrevistado en varias ocasiones.

Este estudio tuvo como fin poder demostrar si la producción de composta y vermicomposta es una buena estrategia de desvío de lodos residuales industriales en vertederos y pulpa de café en fincas o lugares inapropiados. A raíz de la necesidad de reducir la disposición de lodos residuales en los vertederos de Puerto Rico estudiamos la viabilidad de desvío al producir composta con estos residuos y pulpa de café. De igual forma se utilizaron como guía de estudio las diferentes leyes y reglamentos estatales y federales que aplican al proceso de producción de composta. A continuación se presentan los pasos que se siguieron para desarrollar la investigación.

Estudiar la viabilidad de la producción de composta y vermicomposta a partir de la combinación de pulpa de café y lodos residuales como los de la industria “X” para reducir la disposición de lodos con alto contenido orgánico en los vertederos.

Estudiamos el costo aproximado de la producción de composta al evaluar los costos de transporte y disposición de lodos de la industria “X” que se llevan a cabo. Estos costos incluyen lo siguiente: alquiler del envase, acarreo, disposición y gastos operacionales. De igual forma evaluamos el costo operacional de la producción de composta con datos provistos por la Autoridad de Desperdicios Sólidos.

Revisamos trabajos realizados en Puerto Rico y otros países que se relacionan con el manejo de los desperdicios orgánicos, tales como: pulpa del café, lodos residuales industriales y sanitarios. Sobresalen entre estos, artículos científicos de la revista BioCycle en los meses de julio de 1999 y octubre y noviembre de 2007.

Evaluamos métodos aerobios y anaerobios para la producción de composta en la Autoridad de Desperdicios Sólidos, los beneficios del uso de la composta, los factores que afectan el proceso de compostar y las etapas del proceso. Estudiamos información sobre la producción de vermicomposta en diferentes lugares tales como Ohio, Cuba y Costa Rica, entre otros. De igual forma revisamos las leyes y reglamentos que se relacionan a la producción de composta en Puerto Rico.

Estudiamos las características físicas y químicas de los lodos de la industria “X”. Evaluamos las cantidades generadas por esta industria desde el año 2004 hasta el 2007. Preparamos una gráfica para evaluar el lodo generado por la industria “X”. Esto permitió determinar las cantidades de lodo residual mensual que dispone esta industria en vertederos.

Evaluamos las combinaciones ideales de pulpa de café y lodos para hacer composta y vermicomposta a partir de los resultados del estudio realizado por el Dr. Joaquín A. Chong de la EEA. Basado en esto estimamos la reducción en disposición de lodos de la industria “X” en vertederos que podría lograrse.

Conseguimos información sobre la cantidad de pulpa del café generada en Puerto Rico desde el 2004 hasta el 2006 a través de la Administración de Servicios y Desarrollo Agropecuario de Puerto Rico. Hicimos una gráfica con la producción estimada de pulpa de café. Determinamos la cantidad de pulpa de café que puede ser desviada hacia la producción de composta o vermicomposta en los periodos de cosecha en Puerto Rico.

Determinar el peligro potencial de la disposición de lodos residuales en vertederos en Puerto Rico para identificar los beneficios ambientales de la producción de composta.

Evaluamos el manejo de lodos residuales industriales y desarrollamos estrategias para el mismo en Puerto Rico. Identificamos el impacto que podría tener la disposición de lodos residuales industriales en los vertederos.

Hicimos una evaluación general sobre la generación y métodos de disposición de lodos residuales en las Plantas de Tratamiento de Aguas Usadas de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados. Y preparamos un resumen gráfico que nos presenta la cantidad de lodo generado por los años 2004 a 2006.

Evaluamos las características del lodo de la industria “X”, como un estudio de caso para establecer el daño potencial al ambiente de las sustancias que contienen los lodos residuales de industrias de bebidas carbonatadas y los procesos que ocurren luego de ser dispuestos. Estimamos la cantidad de lodos residuales de la industria “X” que podrían desviarse a la producción de composta con pulpa de café.

Periodo del estudio

La investigación y redacción de la tesis tomó un periodo aproximado de dieciséis meses.

- La búsqueda de información tomó un periodo de cuatro meses.
- Las visitas a la EEA y reuniones con representantes de diferentes Agencias Gubernamentales tomaron un periodo de tres meses.
- La Redacción de Propuesta de Tesis tomó un periodo aproximado de cuatro meses.
- La Ampliación de los capítulos 1 al 3 tomó un periodo aproximado de dos meses.
- La Redacción del resto de la tesis que incluye los Resultados, Conclusiones y Recomendaciones tomó un periodo aproximado de tres meses.

Fuente de Datos

Los datos sobre la producción de composta y vermicomposta a partir de la pulpa del café y lodo residual de la industria “X” son secundarios. Los hemos obtenido del Dr. Joaquín A. Chong y la industria “X”. La información sobre la generación de pulpa de café nos fue provista por el Agrónomo Luis A. Pérez, Subdirector del Programa Compra y Venta del Café, Administración de Servicios y Desarrollo Agropecuario, Departamento de Agricultura. La información de la generación del lodo residual industrial se obtuvo por colaboración de diferentes entidades gubernamentales, tales como: Autoridad de Desperdicios Sólidos, Autoridad de Acueductos y Alcantarillados, Junta de Calidad

Ambiental, Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) entre otros. La información de la industria “X” nos fue provista por su alta gerencia.

Como parte de la metodología, se realizaron varias gestiones de investigación para el desarrollo del estudio. Estas gestiones incluyen:

Visitas a la Estación Experimental Agrícola de Adjuntas y entrevistas con el Dr. Joaquín A. Chong.

- 20 de abril de 2007
- 11 de mayo de 2007

Durante estas visitas se realizaron evaluaciones del proceso de producción de composta y vermicomposta con pulpa de café producida en la EEA y lodo residual de la industria “X”. De igual forma se discutieron los resultados de los análisis químicos y físicos de los productos del proceso. El Dr. Joaquín A. Chong nos proveyó los datos sobre la cantidad de pulpa generada en la Estación Experimental Agrícola.

Nos reunimos con el Agrónomo Luis A. Pérez, Subdirector del Programa Compra y Venta del Café, Administración de Servicios y Desarrollo Agropecuario, Departamento de Agricultura el 21 de junio de 2007. En esta reunión se discutió el proceso de cosecha de café en Puerto Rico y los problemas relacionados a la disposición y desvío de la pulpa del café. Se pudo obtener los datos de la generación de pulpa de café en Puerto Rico desde el año 2003 hasta el 2006. Con esta información desarrollamos una gráfica que nos presenta el aumento en producción de café y generación de pulpa en los pasados años.

También nos reunimos con la Sra. Margarita Dijols, Ayudante especial del Director Ejecutivo de la Autoridad de Desperdicios Sólidos (ADS) el 11 de septiembre de 2007. En esta reunión se discutió el Estudio de Vida Útil de los Sistemas de Relleno

Sanitario en Puerto Rico preparado por ADS en el año 2004. Se espera que el estudio sea publicado en el año 2008. Se discutieron los planes futuros de ADS para el manejo de desperdicios en Puerto Rico y se obtuvo una tabla que resume el Estudio de Vida Útil y nos resume información sobre los vertederos de Puerto Rico, como las toneladas de desperdicios que reciben por día, su tiempo útil y sus posibilidades de expansión.

De igual forma nos reunimos con la Sra. Lizbi Pagán, de la División de Cumplimiento de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados el 24 de diciembre de 2008. Durante esta reunión se obtuvieron los Informes Anuales de Cumplimiento de acuerdo con el 40 CFR Parte 503 desde el año 2004 hasta el año 2006 que entrega la AAA a la EPA. Estos informes presentan las alternativas de desvío que utiliza esta agencia para manejar sus desperdicios orgánicos y la generación de lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas Usadas en Puerto Rico.

Sostuvimos conversaciones extensas con las siguientes personas para conseguir información sobre la cantidad de lodos residuales industriales que son dispuestos en los vertederos. Sin embargo las industrias mencionadas a continuación no están dispuestas a divulgar información concreta sobre sus operaciones.

- René Rodríguez, Environmental Manager Waste Management (WM) en Octubre, 2007.
- Jeannette Soto, Special Waste Sales Representative de LM Waste Service Corp. en Octubre, 2007.
- Margorie Martínez, Encargada del Área Ambiental de LM, en Noviembre, 2007.

- Walter Maldonado, José Torres Gerente de Ventas de BFI en Octubre, 2007.
- José Torres, Gerente de Ventas de BFI en Noviembre, 2007.

Con el Sr. Luis Ceinos, Gerente de Planta de Tratamiento de la Industria “X” sostuvimos varias conversaciones y reuniones en Octubre, 2007 y Febrero, 2008. En estas se obtuvo información sobre el lodo generado desde el año 2004 hasta el año 2007, los costos de manejo, transporte y disposición del lodo.

Se intentó obtener información sobre la generación de lodos residuales industriales en Puerto rico en las siguientes agencias.

Autoridad de Desperdicios Sólidos

Sra. Mari Olga Santiago el 3 de diciembre de 2007

Sra. Margarita Dijols, Ayudante especial del Director Ejecutivo, el 6 de diciembre de 2007.

Asociación de Industriales

Sra. Adianez Ortiz, Coordinadora de Asuntos Internos y Asuntos de Gobierno, el 4 de diciembre de 2007.

Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA)

Sra. Brisaira Morales, División de Calidad de Agua, el 4 de diciembre de 2007.

Sra. Lizbi Pagan, División de Cumplimiento, el 7 de diciembre de 2007.

Sra. Lizbi Pagan, División de Cumplimiento, el 24 de diciembre de 2008.

Junta de Calidad Ambiental (JCA)

Sra. María Ortiz, División de Terrenos, el 4 de diciembre de 2007.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Introducción

Realizamos este estudio con el propósito de evaluar la reducción en disposición de lodos residuales en los vertederos y pulpa de café en la fincas de Puerto Rico. Se entiende que la materia orgánica en los suelos es un atributo importante para la calidad de los mismos (Doran y Parkin, 1994).

Es factible transformar residuos sólidos inestables a través de procesos biológicos para proteger el ambiente y desarrollar la agricultura. Al momento de desarrollar una planta de composta se encuentran un gran número de limitaciones, económicas y regulatorias, entre otras. Para tener una planta de composta exitosa es necesario desarrollar un sistema apropiado en cuanto a tamaño, volumen y materias primas. Se espera que en lugar de disponer de un potencial contaminante, con la composta podamos obtener una fuente que provea ganancias económicas y ventajas ambientales.

Investigaciones realizadas en el estado de Ohio han demostrado el potencial de la vermicomposta producida por una gran variedad de desperdicios orgánicos en suprimir enfermedades en plantas.

Los usos principales que se le dan a la composta son:

- Una enmienda de suelo.
- Propagación en suelos de campos de golf.
- Horticultura.

- Cubierta de suelo de alta calidad.

En este estudio evaluamos los costos de transporte, manejo y disposición de lodo residual en la industria “X” (Tabla 1). Se determinó que el gasto mensual de la industria “X” es de \$6,278.54, lo cual equivale a un gasto anual de \$75,342.48 por concepto de: alquiler de un envase o vagón de 20 yds, acarreo, disposición de lodo, además de la compra de polímero. Si esta industria utilizara el desvío de lodo hacia la producción de composta ciertos costos se mantendrán similares a los actuales, a saber: polímero y alquiler del vagón. El costo de acarreo varía de acuerdo a la distancia de transporte, por lo que si se lleva a una instalación localizada en algún municipio limítrofe este se reduciría de manera considerable. Por otro lado el costo en una instalación que desvía sus desperdicios a la producción de composta sería diferente al costo por disposición en un vertedero. Los costos evaluados para el desvío hacia una planta de composta para la industria “X” son equivalentes a un gasto mensual de \$3,120.54, lo que equivale a un gasto anual de \$37,446.48 (Tabla 2). Cabe mencionar que debido a la disminución de terreno disponible para la disposición de desperdicios sólidos el costo de los que aún operan se incrementará de forma considerable.

La industria “X” ha generado una cantidad bien similar de lodo residual (1,300 yardas) en los años 2005, 2006 y 2007. Su generación se relaciona con la producción de bebidas carbonatadas y su variación en producción es pequeña. Incluimos un resumen gráfico de los datos provisto por la industria “X”, al final de la tesis (Figura 2).

La ADS presenta diferentes alternativas para el manejo de biosólidos (lodos). De igual forma menciona dos métodos para elaborar composta, el aerobio y el anaerobio. Aunque por lo general la composta se realiza bajo el método aerobio. En el método

aerobio los residuos son degradados en presencia de oxígeno con la ayuda de microorganismos tales como hongos y bacterias. Durante este proceso de degradación la temperatura puede sobrepasar los 90⁰ Fahrenheit. En el método anaerobio los residuos se biodegradan en ausencia de oxígeno. Las temperaturas presentes en este proceso son similares a las del método aerobio.

Los factores que afectan el proceso de producción de composta son:

- Para que ocurra un proceso apropiado de compostaje, es necesario establecer un balance entre materiales con una concentración alta de carbono empleados para generar energía y materiales con una concentración alta de nitrógeno, que son necesarios para el crecimiento y la reproducción. Los bajos niveles de nitrógeno reducen la velocidad de la descomposición, mientras que niveles excesivos generan sustancias con olores objetables.
- La humedad debe estar entre 40% y 60%. Menos de 40% causa que las bacterias disminuyan su metabolismo por que entra en una etapa inactiva. Humedad mayor de 60% causa una disminución en la descomposición del residuo, lo que produce sustancias con olores objetables.
- El contenido de oxígeno es importante para que los microorganismos produzcan composta.
- La temperatura aumenta según avanza el proceso de descomposición de los desperdicios. Un compostaje rápido es producto de una mezcla en la cual las temperaturas fluctúan entre los 90⁰ y 140⁰ Fahrenheit.

Las etapas por las que pasa el material compostado son:

La materia orgánica es degradada, según los microorganismos consumen las proteínas y carbohidratos presentes en los residuos sólidos. Éstos forman una sustancia con altos niveles de nutrientes, de color oscuro y muy parecido a la tierra. Al final la actividad microbiana es reducida, la temperatura de la pila disminuye y el resultado es apropiada para la supervivencia de insectos y lombrices de tierra.

Las Plantas de Tratamiento de la AAA generan cantidades considerables de toneladas métricas de lodo residual anual. La Sra. Lizbi Pagán de la AAA, nos proveyó los *Informes Anuales de Cumplimiento* desde el 2004 hasta el 2006, del manejo de lodos residuales en Puerto Rico de acuerdo con el 40 CFR Parte 503, que presenta la AAA a la EPA. Desarrollamos un resumen gráfico con estos datos y observamos que la generación de lodo ha ido en aumento constante durante los pasados años (Figura 1).

Los métodos de disposición utilizados por la AAA son presentados en estos informes, a saber: disposición en vertederos, combustión, inyección al terreno (Planta de Tratamiento de Aguas Usadas de Barceloneta), producción de composta y celdas especiales en vertederos (Figura 3). La disposición en vertederos ha ido en ascenso en la medida que ha aumentado la generación de lodos residuales. La producción de composta tuvo una pequeña disminución en el año 2005 con respecto al 2004, pero aumentó para el año 2006 (Apéndice 4). Sin embargo la utilización de métodos alternos a la disposición en vertederos no ha sido desarrollada en tal forma que se pueda reducir dicha disposición.

Es necesario el desarrollo de plantas de producción de composta en Puerto Rico para reducir el volumen de residuos de lodo que se dispone en los vertederos. La industria “X” ha desarrollado una iniciativa de evaluar opciones para el manejo de sus lodos residuales, tales como: producción de composta, vermicomposta, alimento para animales y cubierta diaria en los vertederos. Estas iniciativas han sido evaluadas y se ha determinado que son viables. Para poder desviar el lodo hacia la producción de alimento para animales sería necesario un aumento en la concentración de la materia sólida del lodo. Esto es posible utilizando tecnologías existentes para secarlo.

Al evaluar las alternativas de producción de composta y vermicomposta mediante visitas, reuniones e informaciones suministradas yo he constatado que es viable la degradación del material orgánico del lodo, así como de la pulpa de café por medio del compostaje.

Datos de electro-conductividad (mS/cm) demostraron que la cantidad de sales son altas y que se requerirá la reducción de éstas para poder utilizar este sustrato (composta) para crecer plantas ornamentales. En otras palabras, una vez reducidas las sales, las plantas ornamentales pueden crecer de manera favorable en este material compostado. Los resultados demostraron que se logró compostar lodos residuales de la industria “X” en proporción de 1:2 con pulpa del café y que el lodo puede ser vermicompostado hasta una proporción máxima de 25% lodo y 75% pulpa de café, ya que un aumento en lodo resulto en un aumento en mortalidad de lombrices. (Comunicación personal sobre resultados de investigación que será publicado por el Dr. Chong).

Los lodos residuales de la industria “X” contienen alrededor de 23.6% de materia sólida (Apéndice 5), mientras que según la AAA los lodos residuales de sus procesos

varían de acuerdo al método de secado de las plantas, y pueden ser de un 15 - 20%. Esto implica que el porcentaje de sólidos en ambos lodos es muy similar. Cuando se degradan los desperdicios depositados en un vertedero, los productos de descomposición son removidos por el agua que migra; transformándola en lixiviados, los cuales pueden tener todas las características de aguas usadas industriales (Pavón et al., 1975). Los lixiviados son el resultado del contacto del agua con los desperdicios sólidos. Estos pueden ser definidos como un líquido que ha percolado a través de los desperdicios sólidos y que ha extraído materiales disueltos o suspendidos (Technobanoglous & Kreith, 2002). Los lixiviados pueden contener: demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), iones de metales pesados, nutrientes y compuestos orgánicos (Bailie et al., 1999).

En años recientes el tratamiento del lixiviado de los vertederos municipales ha recibido mucha atención Uygur y Kargi, (2004). Las características de los lixiviados que se generan en un SRS dependen del tipo de desperdicios sólidos y del material de cubierta. Es preciso señalar que, de acuerdo al *Waste Characterization Study Report* (2003), los desperdicios orgánicos, de jardinería, demolición y construcción representan la fracción más alta del promedio de composición de los desperdicios descartados en Puerto Rico. Los Lixiviados pueden variar desde ser poco tóxicas a bien tóxicas. Por lo general, los lixiviados tienen alta concentración de carbono orgánico, amoníaco, cloruro, hierro y otros iones de metales masivas (Haarstand & Borch, 2004). Cabe señalar que los lodos que genera la industria “X” no contienen iones de metales pesados.

Por otro lado, la cantidad de lixiviados que se generan en un SRS depende de los factores climáticos del área y balance de agua del revestimiento que cubre los

desperdicios sólidos. El volumen también es afectado por: la humedad de los desperdicios sólidos, su composición, las transformaciones químicas y bioquímicas que ocurren en estos y el flujo de agua que entra al SRS a través de diferentes fuentes (Stomezynska & Stomezynki, 2004).

Cuando se contaminan los cuerpos de agua por lixiviados que contienen iones de metales pesados, el mecanismo de bioacumulación es el que produce problemas de salud. Los efectos sobre la salud no están limitados al agua que se ingiere, sino también puede ocurrir por la cadena alimentaria, debido a la ingestión de otros organismos que habitan en ambientes contaminados. Los lixiviados se pueden acumular y concentrar en los organismos y los sedimentos. La muerte de estos organismos permite la recirculación de los contaminantes en el agua. Además de la bioacumulación, ciertos hidróxidos de metales, como hierro, pueden cubrir los sedimentos, no permitiendo la alimentación en el fondo. Por consiguiente, el abastecimiento de alimentos para los organismos bénticos disminuye (James, 1977).

El manejo efectivo de los desperdicios sólidos se ha convertido en una preocupación social mayor (Eises y Onay, 2003). El impacto principal del lodo residual en un vertedero es la generación de lixiviado debido a su alto contenido de agua. Al desviar los lodos hacia la producción de composta y vermicomposta se reduce la disposición de lodo en los vertederos, el impacto en las aguas subterráneas y superficiales, la emanación de metano y la intensificación de efecto invernadero.

Sin embargo existen otros efectos por la disposición de residuos orgánicos que afectan el ambiente. En un vertedero los lodos se descomponen en un proceso anaerobio, lo que produce metano (CH_4) y bióxido de carbono (CO_2). El metano es más de veinte veces más efectivo que el bióxido de carbono absorbiendo rayos infrarrojos y por lo tanto calor, lo que contribuye en gran medida al calentamiento global. Calienta el ecosistema veinte veces más por molécula que el CO_2 y tiene un periodo de duración en la atmósfera de 12 años. Por lo tanto una reducción significativa en la emanación tendría un rápido efecto en la temperatura de la tierra. El metano se produce en cultivos, minas de carbón y producción de energía, pero los vertederos son los mayores contribuyentes en su producción.

En el proceso de producción de composta los lodos pasan por un proceso aerobio y producen materia orgánica estabilizada, CO_2 y calor. Esto implica una ventaja ambiental al lograr el desvío de lodos hacia la producción de composta. De esta forma se reduce la formación de lixiviados en vertederos, el tiempo útil de un vertedero aumentará, mejorará la calidad de los suelos, al igual que la calidad de agua.

El procesamiento del café puede causar contaminación del agua. Los lugares en los cuales se procesa este fruto son conocidos como beneficiados. Éstos se encuentran en lugares cercanos a los ríos, ya que se les facilita la transportación, el manejo y la utilización del agua necesaria para el procesamiento del café y reduce los costos de producción. Esto no representaría ningún problema para la calidad del agua si los beneficiadores manejaran de forma apropiada los desperdicios o subproductos del café, entre estos la pulpa. Sin embargo, en Puerto Rico no ocurre, ya sea porque estos tienen

una charca de disposición inapropiada, por la ineficiencia en el proceso de remover el mucílago o por falta de orientación.

Conseguimos información sobre la producción de pulpa de café en Puerto Rico a través de la Administración de Servicio Agropecuario y preparamos una gráfica de producción estimada de pulpa de café (Figura 4, Apéndice 1). La misma nos muestra que la cosecha 2003-2004 fue 4,581.37 toneladas mayor que la cosecha 2004-2005. Las cosechas del 2005-2006 y 2006-2007 produjeron un incremento gradual en la producción de pulpa de café. En la EEA la producción de café es pequeña y representa unas 14,000 a 15,000 libras de pulpa al año. No establecimos una relación entre la pulpa del café generada en la Estación Experimental Agrícola en Adjuntas con el lodo generado por la industria “X” ya que los costos de transportación serían muy elevados, lo que implica que el desvío no es viable en términos económicos a esta distancia.

La Planta de Tratamiento de la industria “x” genera unas 1,300 yds anuales de lodo residual, lo cual equivale aproximadamente a 1,000 toneladas. Según los resultados que obtuvimos por el Dr. Joaquín Chong se produce composta en relación 1:2 lodo residual con pulpa de café, por lo que es necesario tener 2,000 toneladas de pulpa de café por cada 1,000 toneladas de lodo residual para realizar el compostaje. Esto implica que en la cosecha 2004-2005, cuando se generaron 6,164.33 toneladas de pulpa y en la que la industria “X” generó 1,000 toneladas de lodo, se necesitan 2,000 toneladas de pulpa para producir composta por cada 1,000 toneladas de lodo y aún así sobran 4,164.33 toneladas de pulpa sin utilizarse. Ya que la generación de lodo residual de la industria “x” por los años 2005, 2006 y 2007 se mantuvo constante en 1,000 toneladas, la relación que desarrollamos para la producción de composta en los siguientes años es la misma, con la

variante de la generación de pulpa que aumentó gradualmente. En la cosecha 2005- 2006 se generaron 9,924.11 toneladas de pulpa por lo que al hacer la relación con las 1,000 toneladas de lodo generado en el 2006 sobran unas 7,924.11 toneladas de pulpa de café para ser utilizadas. Así mismo ocurre con la cosecha 2006-2007 donde se generaron 10,485.27 toneladas de pulpa de café que combinadas con las 1,000 toneladas de lodo residual generado por la industria “X” sobran unas 8,485.27 toneladas de pulpa de café a ser utilizadas.

La industria “x” se dedica a la manufactura de bebidas carbonatadas y tiene un “Standard Industrial Code” (SIC) 2086. En Puerto Rico existen otras 4 industrias bajo la misma clasificación y unas 4 más que realizan productos parecidos. Esto implica que estas industrias producen lodos residuales con características muy similares al lodo de la industria “x”. Establecemos que la pulpa restante a la que podría ser utilizada para la producción de composta con el lodo de la industria “X” podría ser utilizada con el mismo propósito con lodo residual generado por estas otras industrias.

Los desperdicios de proceso de producción de café pueden alterar el ambiente, al generar contaminación de agua, aire y suelos. Esto altera a su vez la calidad de vida de los humanos. Se ha evaluado el impacto ambiental de los desperdicios de pulpa de café en Puerto Rico y Cuba. De igual forma se buscaron soluciones protectoras del ambiente natural y productoras de energía para reducir los desperdicios orgánicos que son vertidos tanto en los vertederos como en los cuerpos de agua de nuestro país. La Junta de Calidad Ambiental prohíbe la disposición de pulpa de café en ríos y quebradas. Esta disposición tiene que ser realizada en facilidades de almacenamiento y por lo general la pulpa es dispuesta en fincas.

En Puerto Rico los centros de despulpe de café se encuentran ubicados en zonas montañosas. En estas zonas hay ecosistemas acuáticos frágiles, debido a que este proceso se lleva a cabo en los meses de sequía. Los ríos disminuyen su caudal aumentando la concentración de sustancias contaminantes que puedan estar presentes. En tiempos de lluvia los ríos y lagunas que se desbordan afectan las aguas superficiales y el subsuelo con contaminantes.

Se entiende que el beneficiado de café ha representado una de las mayores fuentes de contaminación de las aguas superficiales, del subsuelo y de nuestro entorno en general desde sus inicios. Cuando la pulpa se acumula a la intemperie después de una cosecha, esta produce sustancias con olores desagradables y atrae insectos.

Los principales impactos ambientales que puede causar la pulpa del café cuando se maneja de forma inapropiada son:

- Acidez en las aguas ($\text{pH} < 7$).
- Sustancias con olores nauseabundos.
- Proliferación de moscas por las cantidades de azúcares y pectinas.
- Inhabilitación del consumo de agua de los humanos, el ganado y por ves a la irrigación.
- Destrucción de los ecosistemas acuáticos.
- Impacto sobre suelos irrigados con esta agua.
- Eleva la generación de metano.
- Aumenta la concentración de Ca, K, Mg, y P en el agua.
- Aumenta la carga orgánica y del consumo de oxígeno en el agua, al aumentar la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) por encima de

2,500 mg/L, y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) por encima de 3,000 mg/L.

- Aumento en sólidos en suspensión

Se evaluaron tres alternativas de desvío para el uso de pulpa de café, estas son:

- Producción de composta.
- Tratamiento anaerobio para obtención de biogás.
- Producción de hongos comestibles.

La EPA y la JCA reglamentan la producción de composta elaborada con biosólidos y evalúan la maduración del material compostado, la reducción de patógenos y la concentración de contaminantes.

El buen manejo de los desperdicios sólidos incluye reducir o eliminar la generación de desperdicios sólidos, compostar, reusar y reciclar materiales, convertir desperdicios en energía, y los residuos restantes enviarlos a un SRS.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Introducción

En este estudio validamos con datos y materiales reales la viabilidad de la producción de composta y vermicomposta a partir de la pulpa de café de la EEA y los lodos residuales de la industria “X”.

Conclusiones

Es importante ser capaces de reducir el enorme volumen de agua que es utilizada en los beneficiados del café, tratar la carga orgánica que alcanza los cuerpos de agua y reducir el impacto negativo en el desempeño económico de la industria cafetalera.

La vía solar para secar la pulpa muestra ser una muy limpia en términos de emanaciones de bióxido de carbono (CO₂), bióxido de azufre (SO₂), y bióxido de nitrógeno (NO₂). La parte sólida del residuo de pulpa de café se puede convertir en abono orgánico mediante un proceso de compostaje o vermicompostaje utilizando lombrices rojas californianas, lo cual permite obtener abono orgánico de calidad y proteína para uso animal.

La producción del café puede generar residuos contaminantes al medio ambiente, pero a su vez puede generar materia prima. Utilizada en el crecimiento sustentable y promueve la protección del ambiente.

Los beneficios de desviar la pulpa de café hacia procesos ambientales incluyen la reducción de la acidez en las aguas (pH < 7) y las sustancias con olores inaceptables. De igual forma protege el agua que consumen los humanos y el ganado se usa para la

irrigación. Existen tres alternativas de desvío para el uso de pulpa de café; producción de composta, tratamiento anaerobio para obtención de biogás y producción de hongos comestibles.

El desvío de la pulpa del café de la EEA y el lodo de la industria “X” hacia la EEA no es viable ya que el costo de transportación o de acarreo sería muy elevado. La EEA no tiene la potestad de comprometerse con la industria “X” a tratar sus lodos. Sin embargo es viable la producción de composta en la EEA con materia orgánica o materia vegetativa como se hace en la Planta de Composta de Arecibo. Este reduciría de manera considerable el costo y pudiese evitar la disposición de la pulpa en terrenos de fincas. De esta forma se previenen posibles efectos ambientales dañinos. Para la industria “X” es en términos económicos viable disponer de sus lodos en la producción de composta si el lugar está cercano (Tabla 2).

Los beneficios que se pueden obtener de la composta son:

- Fertilización orgánica; esta puede ayudar a airear la tierra arcillosa y mejorar la capacidad de retención de agua en un suelo arenoso.
- Suministra nutrientes a plantas sin contaminar el suelo, el aire o el agua.
- Fortifica las plantas haciéndola más resistentes a plagas y enfermedades.
- Enriquece suelos desgastados por el uso de abonos y fertilizantes químicos y por la erosión.
- Permite el intercambio de gases vitales necesarios para las raíces de las plantas por la porosidad que proporciona.

- Ayuda a mantener la temperatura del suelo bajo ciertos límites en días fríos y cálidos.
- Promueve la reducción de desperdicios sólidos ya que no produce basura.

En los resultados obtenidos por el estudio del Dr. Joaquín A. Chong se demostró que es viable la producción de composta y utilizando lodo residual industrial y pulpa de café.

Los vertederos han sido el método más económico para la disposición de desperdicios sólidos según el Recycler's Manual, (1993). Se proyecta que este método será uno de los más costosos con el pasar de los años, debido a que la generación de desperdicios sólidos ha ido en aumento debido a nuestros estilos de vida, y a que desde el año 1984 muy pocos vertederos o SRS han sido construidos. La escasez de SRS ha causado que los SRS o vertederos existentes se saturen y el costo de disposición crezca de manera continua. Según Lund (1993), y cito: "Se estima que el costo de disposición aumentara de un 25 a un 40 por ciento anual" se cierra la cita. Por lo que es de suma importancia utilizar métodos alternos que sean seguros en términos ambientales y viables en términos económicos para el manejo de los residuos sólidos.

La digestión anaerobia en un vertedero ocurre en una serie de etapas que se caracterizan por el aumento y reducción de poblaciones bacterianas específicas y por la formación y utilización de ciertos productos metabólicos. El biogás se puede obtener al digerir el material orgánico de desperdicios sólidos municipales. La composición de desperdicios sólidos varía de acuerdo a la fuente del desperdicio. Los mayores constituyentes de gases en vertederos son metano y bióxido de carbono, los cuales contribuyen de forma significativa al calentamiento global. El desvío de residuos de lodo

hacia la producción de composta ayuda a disminuir el calentamiento global y la generación de lixiviados, protegiendo así los cuerpos de agua.

La AAA está en proceso de desarrollar un plan para el manejo de biosólidos. La generación de lodos residuales por la AAA ha ido en aumento constante, al igual que la disposición de lodos residuales en los vertederos. Si no somos proactivos con alternativas que ayuden a proteger el ambiente en el manejo de desperdicios sólidos, será muy difícil evitar que se degrade.

He llegado a la conclusión de que la producción de composta y vermicomposta con pulpa de café será viable para la industria “X”, otras industrias de bebidas carbonatadas al igual que para las plantas de tratamiento de aguas usadas de la AAA.

Recomendaciones

Recomendamos que se cuantifique la generación, manejo y disposición de los lodos residuales industriales de Puerto Rico. También que se utilicen lodos de la AAA e industriales para mezclarlos con pulpa del café y así producir composta y vermicomposta. Hay que llevar a cabo pruebas de laboratorio para determinar sus características físicas y químicas, lograr la mejor calidad de la composta y maximizar los beneficios ambientales del producto.

Recomendamos que el gobierno desarrolle un plan que incentive a las industrias y a los municipios a crear plantas de composta y utilizar la composta generada, en sus áreas verdes y recreativas como un método de impulsar su uso. Es urgente encontrar varias alternativas de uso, para el desarrollo del mercado de la composta.

Recomendamos que la AAA identifique las limitaciones en el manejo de biosólidos lo antes posible para que puedan hacer los cambios necesarios en sus procesos

de tratamiento de aguas usadas y aumente la cantidad de composta que se produce. Esto reducirá el impacto sobre los vertederos, para la disposición de los desperdicios sólidos, en particular los biosólidos.

Recomendamos que la AAA evalúe diferentes tecnologías para el secado de lodos residuales. Esto aumentará las posibles alternativas de utilizar lodos en otras actividades de desvío.

El estado debe reglamentar la disposición de pulpa de café en fincas y forzar a los agricultores a transportar la pulpa para otros fines como la producción de composta en lugar de disponer de la misma en terrenos inapropiados o fincas.

Recomendaciones para estudios futuros:

Se pueden estudiar diferentes alternativas para el uso del pergamino del café que también representa un problema ambiental.

Estudiar el consumo de agua en los centros de despulpe para evaluar los principales impactos sobre cuerpos de aguas cercanos a la industria cafetalera en Puerto Rico.

Limitaciones del estudio

Realizamos las gestiones pertinentes para obtener información exacta de la generación de lodos residuales industriales en Puerto Rico en la Junta de Calidad Ambiental (JCA) División de terrenos, la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA) División de Calidad de Agua, Asociación de Industriales y en la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), y no se ha suministrado esta información. Ninguna de estas agencias solicita la información a las industrias ni la tiene disponible en sus archivos.

De igual forma empresas privadas tales como BFI, WM Y L&M Waste no nos brindaron la información por razones de competencia comercial. Cabe señalar que estas últimas sí recopilan la información.

No es posible determinar el aumento en tiempo útil de un vertedero ya que no es posible establecer cuál será el por ciento de humedad presente con el pasar del tiempo en el residuo. Al igual que no es posible establecer la densidad del lodo en el proceso de descomposición en el vertedero por lo que es difícil cuantificar el espacio que ocuparía.

LITERATURA CITADA

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades – ATSDR. (2004). *Perfil Toxicológico para Amoniaco*. Extraído el 12 de junio de 2007.
www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp126.html
- Atiyeh, R. M. Subler, S., Edwards, C. A., Bachman, G., Metzger, J. D., and Shuster, W. (2000). *Effect of vermicomposta and compost on plant growth in horticultural container media and soil*. Urban & Fisher Verlag: Esevier Gmmtt.
- Atiyeh, R. M., Domínguez, J., Subler, S. and Edwards, C. A., (2000). *Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (Eisenia Andrei, Bouché) and the effects on seedling growth* Pedobiología, 44:709-724.
- Atiyeh, R. M., Lee, S., and Edwards, C. A. and Edwards, C. A., (2000). *Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (Eisenia Andrei Bouché) and the effects on seedling growth*.
- Autoridad de Desperdicios Sólidos. (1992). *Ley para la Reducción y Reciclaje de Desperdicios Sólidos en Puerto Rico – Ley Num. 70 del 18 de septiembre de 1992, según enmendada*. 12 LPRA 320 et.seq.
- Autoridad de Desperdicios Sólidos. (1996). *Orden Ejecutiva 2001-58A del 5 de octubre de 2001 deroga el Plan Regional de Infraestructura para el Reciclaje y Disposición de los Residuos Sólidos en Puerto Rico*.
- Autoridad de Desperdicios Sólidos. (1997). *Reglamento de Desperdicios Sólidos No Peligrosos, este reglamento fue promulgado mediante resolución, R-97-3-93*.
- Autoridad de Desperdicios Sólidos. (2003). *Final Report, Waste Characterization Study Report*: Desarrollado por Wehran- Puerto Rico, Inc. & Shaw E MCON/OWT, Inc. San Juan, Puerto Rico.
- Autoridad de Desperdicios Sólidos. (2007). *Dynamic Itinerary for Infrastructure Projects Technician Report. Núm 2451-110*. Desarrollado por MP Engineers of Puerto Rico, P.S.C. San Juan, Puerto Rico.
- Barr, J.; Eshel, G.; Chen-Levy, Z. & Lahat, E. (2000). Heliox Use in the Treatment of Acute Hyperammonemia. *Journal of Child Neurology*. 16 (6): 456 - 457.
- Brautbar, N.; Wu, M. P. & Richter, E. D. (2003) “*Chronic Ammonia Inhalation and Interstitial Fibrosis: A Case Report and Review of the Literature*” *Archives of Environmental Health*. 8 (9): 592-596.

- Buck, C., Langmaak, M. and Schrader, S. (2000). *Influence of mulch and soil compaction on earthworm cast properties.*
- Chefetz, B. Hadar, Y. and Chen, Y., (1998). *Dissolved Organic Carbon Fraction Formed during Composting of Municipal Solid Waste: Properties and Significance.*
Cléves y Faith, S. A., (1998). *Tecnología en Beneficio del Café. San José, Costa Rica.*
- Domínguez, J., Parmelee, R. W. and Edwards, C. A., (2003). *Interactions between Eisenia Andrei (Oligochaeta) and nematode populations during vermicomposting.*
- Doran, J.W. and Parkin, T.B. (1994). *Defining and assessing soil quality.* En Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F. and Stewart, B.A. (Eds), *Defining Soil Quality for Sustainable Environment.* Special Publication 35: 3-21. Soil Sci. Soc. Am. Inc, Madison, WI.
- Duggan, J.C. and Wiles, C.C. (1976). *Effects of municipal compost and nitrogen fertilizer on selected soils and plants.* Compost Sci., 17 (5), 24-31.
- Erses, A.S., and Onay, T.T., (2003). *Insitu heavy metal attenuation in landfill under methanogenic conditions.*
- Ghosh, M., Chattopadhyay, G. N. and Baral, K., (1999). *Transformatin of phosphorus during vermicomposting.* Bioresource Technology., 69:149-154.
- Hashemimajd, K., Kalbasi, M., Golchin, A., & Shariadmadari, H., (2004). *Comparison of Vermicompost and Compost Potting Media for Growth of Tomatoes.*
- Hellweg, S., Doka, G., Finnveden, G., Hungerbuhler, K., (2005). *Assessing the Eco-efficiency of End-of-Pipe Technologies with the Environmental Cost Efficiency Indicator: A Case Study of Solid Waste Management.*
- Herráez Sánchez de las Matas, I., Monterroso Pérez, L., Gallego López, S. y Julio Barea Luchena. (2001). *Pasado, Presente y Futuro de la Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos y sus Implicaciones en la Contaminación de las Aguas Subterráneas: El Ejemplo del Centro de Tratamiento de Colmenar Viejo.* Departamento de Química Agrícola, Geología y Geoquímica de la Universidad Autónoma de Madrid y ACTEA Gestión Ambiental. España: 221-230.
- Issley, S. & Lang, E., (2006). *Ammonia Toxicity Contribución a lugar en la red.* eMedicine. Extraído el 2 de agosto de 2007.
www.emedicine.com/EMERG/topic846.htm
- James, S.C. (1977). *Metals in Municipal Landfill Leachate and Their Health Effect.* American Journal of Public Health 67 (5): 429-432.

- Junta de Calidad Ambiental. (2004). *Ley sobre política pública ambiental* (Ley 416 del 22 de septiembre de 2004, según enmendada).LPRA § 3553.
- Lund, H.F., (1993). *Recycling Handbook*. McGraw-Hill. 2nd Edition.
- Moscoso, F., (1999). Agricultura y Sociedad en Puerto Rico, Siglo 16 al 18. *Un acercamiento desde la historia*.
- Mulamoottil, G., McBean, E. & F. Rovers., (1999). *Constructed Wetlands for Treatment of Landfill Leachates*. United States of America”CRC Press LLC. 1-16.
- Navaee-Ardeh, Sh., Bertrand, F., Stuart, P. R., (2006). *Emerging Biodrying Technology for the Drying of Pulp and Paper Mixed Sludges*.
- Ndegwa, P. M., Thompson, S. A. and Das, K. C., (2000). *Effects of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids*.Bioresource Technol., 75:7-12.
- O’Kelly, B. C., (2005) *Sewage Sludge to Landfill: Some Pertinent Engineering Properties*.
- Pavoni, J.L., Heer, J.E. & J. Hagerty. (1975). *Handbook of Solid Waste Disposal: Materials and Energy Recovery*. Litton Educational Publication, Inc., United States. 189,234
- Pereira, M. G. and Zezzi-Aruda, M. A. (2003). *Vermicompost as a Natural Adsorbent Material: Characterization and Potentialities for Cadmium Adsorption*.
- Pereira, N., Joao, T., (2001). *Controlled Composting In Developing Countries*.
- Reinhart, D.R. & C.J. Grosh. (1998). *Analisis of Florida MSW Landfill Leachate Quality*. Florida Center for Solid Waste and Hazardous Waste Management. Report #97-3: 1-19.
- Robinson, W. D. (1986). *The Solid Waste Handbook: A Practical Guide*. United Status of America:John Wiley & Sons. 286-313.
- Rohena, S. (2001). *El Manejo de los Desperdicios Sólidos Peligrosos y No Peligrosos de conformidad a la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos* (RCRA) del 21 de octubre de 1976, según enmendada.
- Soto, G., y Muñoz, C. (2002). *Consideraciones teóricas y prácticas sobre la composta y su manejo en la agricultura orgánica*.
- Stomazynska, B & T. Stomeczynki. (2004). *Physico-Chemical and Toxicological Characteristics of Leachates from MSW Landfills*. Polish Journal of Environmental Studies 13 (6): 627-637

- Tchobanoglous, G. & F. Kreith. (2002). Landfilling. *Handbook of Solid Waste Management*. 2nda Edición. United States of America: Mc Graw-Hill 14.30-14.47.
- The Minnesota Pollution Agency. (1994). *Municipal Solid Waste Manual: An Operators Guide to Proper Landfill Practices*. St. Paul, Minnesota: 53-61.
- The Minnesota Pollution Agency. (1996). *Demolition Waste Manual: An Operators Guide to Proper Demolition Landfill Practices*. St. Paul, Minnesota: 59-63.
- Trewavas, A., (2004). *A critical assessment of organic farming-and-food assertions with particular respect to the UK and the potencial environmental benefits of no-till agricultura*.
- Tyler, O., (1998). *Composting Economics have Double Rewards*.
 US Geological Survey., (2005). *Mineral Commodity Summaries for Nitrogen (Fixed) Ammonia*.
- US Environmental Protection Agency. (1979). Parte 256 del Código de Reglamentos Federales Título 40, (40 CFR, por sus siglas en inglés), conocido como las *Guías para el Desarrollo e Implantación de Planes Estatales para el manejo de los Residuos Sólidos*.
- US Environmental Protection Agency. (1979). Parte 257 del 40 CFR – *Criterios para la Clasificación de las instalaciones y Prácticas de Desperdicios Sólidos*.
- US Environmental Protection Agency. (1992). Parte 258, 40 CFR – *Criterios para Rellenos Sanitarios de Desperdicios Sólidos*.
- US Environmental Protection Agency. (1978). *Ley de Agua Limpia, según enmendada* (CWA, por sus siglas en inglés). 33 U.S.C. S/S 1251 et. Seq. (1972).
- US Environmental Protection Agency. (1970). *Ley de Aire Limpio, según enmendada* (CAA, por sus siglas en inglés). 42 U.S.C. S/S 7401 et. Seq. (1970).
- US Environmental Protection Agency. (1976). *Ley de Conservación y Recuperación de Recursos* (RCRA por sus siglas en inglés). 42 U.S.C. S/S 6901 ET. SEQ.
- Uygur, A., and Kargi, F., (2004). *Biological nutrient removal from pretreated landfill leachate in a sequencing batch reactor*.
- Van der Ploeg, R.R. Bohm, W. and Kirkham, M.B., (1999). *On the origin of the theory of mineral nutrition of plants and the law of the minimum*. Soil Science Society of America Journal 63:1055-1062.

TABLAS

Tabla 1

Costos operacionales de disposición de lodo de la industria "X".

Concepto	Tarifa	Costo Mensual	Costo Anual
Alquiler del envase	\$100.95 Por mes	\$100.95	\$1,211.40
Acarreo	\$300.00 Por viaje	\$2,400.00	\$28,800.00
Disposición	\$365.00 Por 20 yds.	\$2,920.00	\$35,040.00
Gastos Operacionales	\$857.59 Por mes	\$857.59	\$10,291.08
Costo Total		\$6,278.54	\$75,342.48

Tabla 2

Costos de desvío de lodo hacia composta por la industria "X".

Concepto	Tarifa	Costo Mensual	Costo Anual
Alquiler del envase	\$100.95 Por mes	\$100.95	\$1,211.40
Acarreo	\$160.00 Por viaje	\$1,280.00	\$15,360.00
Planta de Composta	\$882.00 Por mes	\$882.00	\$10,584.00
Gastos Operacionales	\$857.59 Por mes	\$857.59	\$10,291.08
Costo Total		\$3,120.54	\$37,446.48

FIGURAS

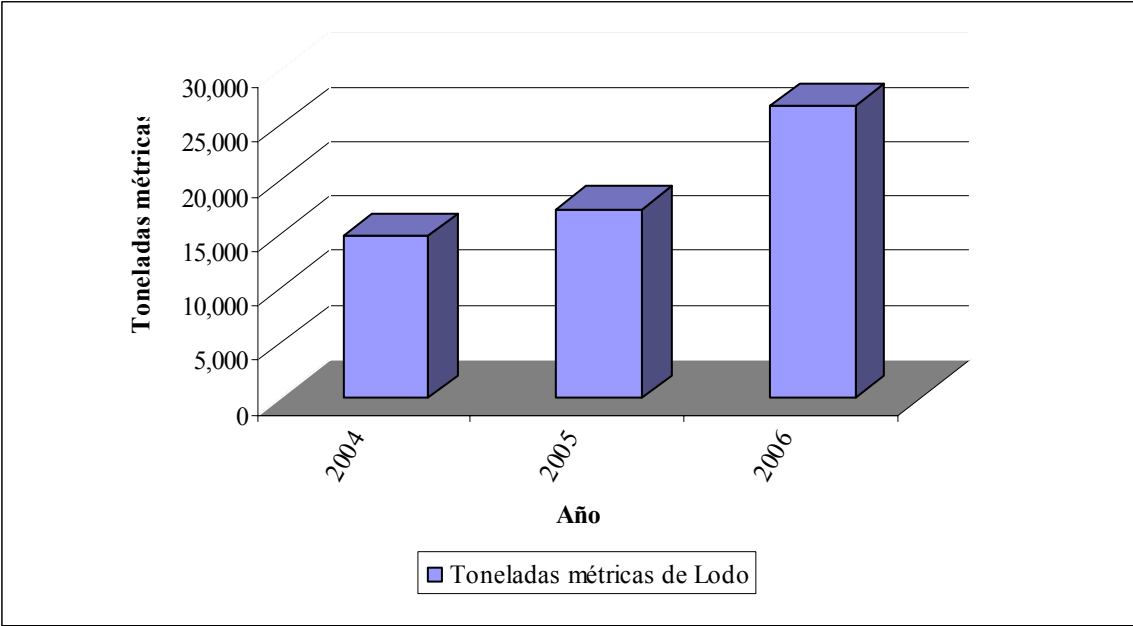


Figura 1. Generación de lodos de AAA por año en toneladas métricas.

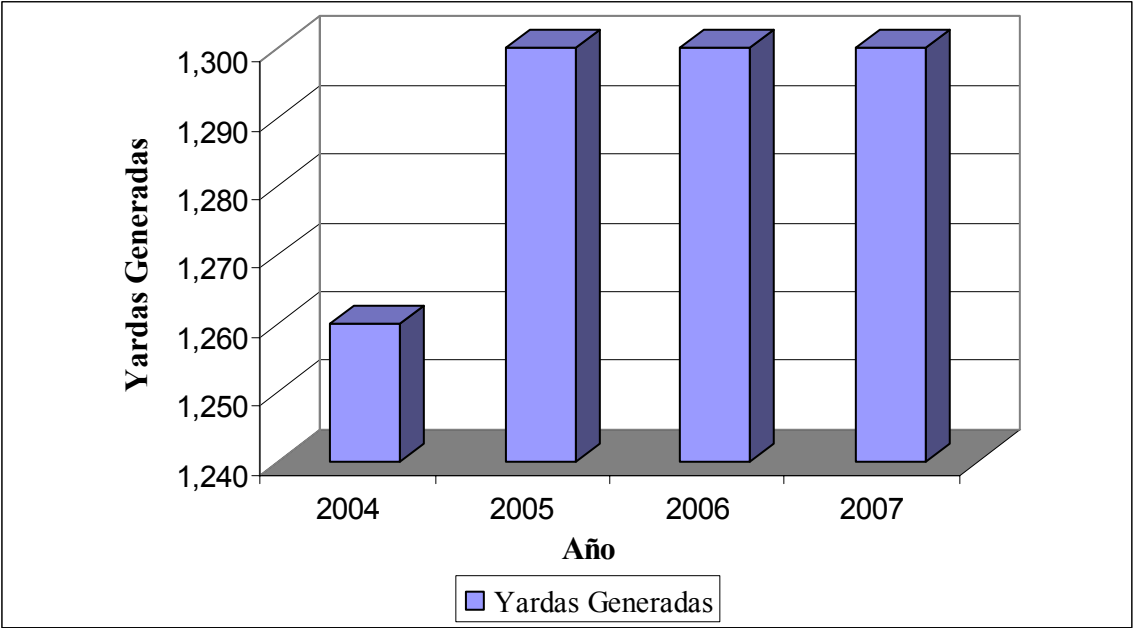


Figura 2. Generación de lodo de la industria “X” en yardas por año.

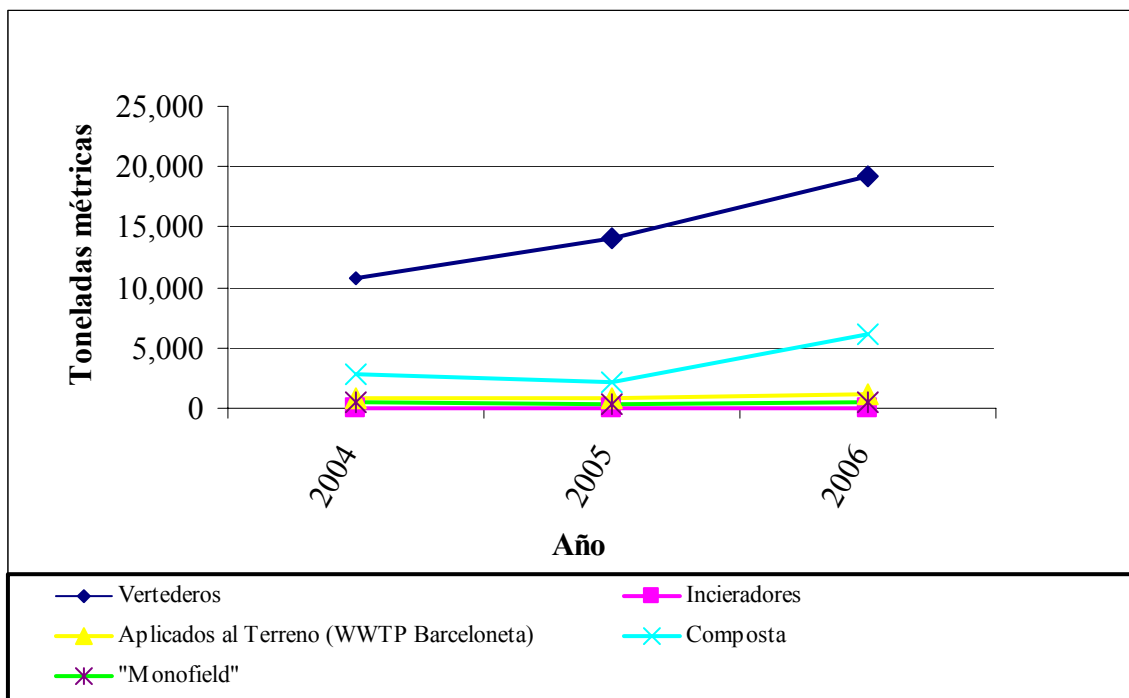


Figura 3. Métodos de disposición de lodos residuales generados por la AAA.

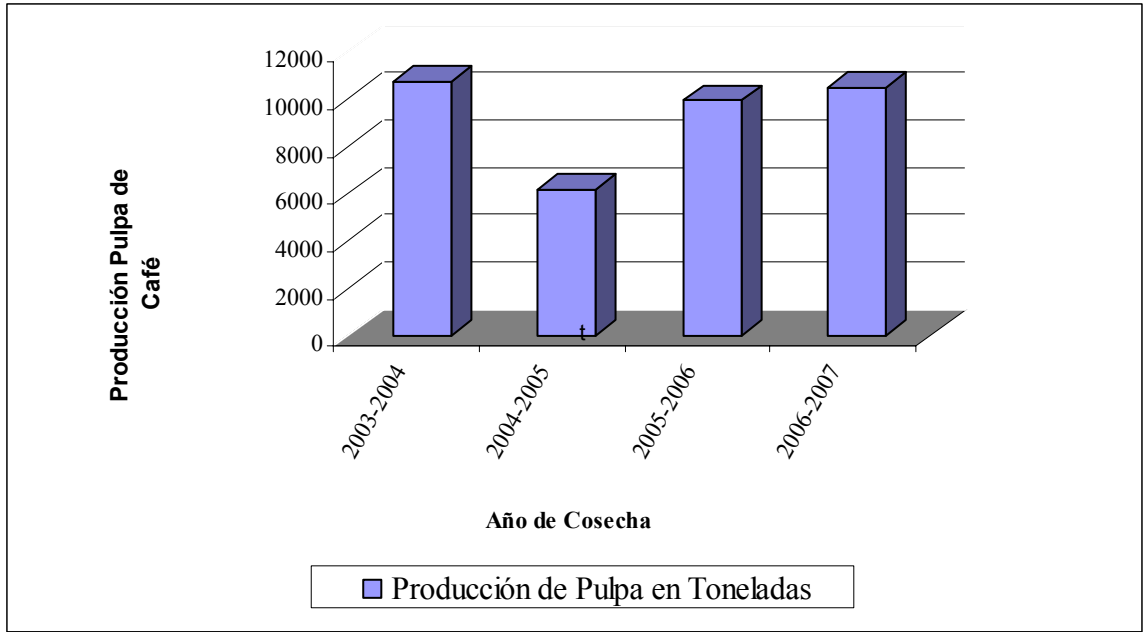


Figura 4. Producción estimada de pulpa de café en Toneladas por año en Puerto Rico.



Proceso de compostaje



Producto final de composta

Figura 5. Fotos del proceso de compostaje en la Estación Experimental Agrícola de Adjuntas.



Proceso de vermicompostaje



Producto final de vermicomposta

Figura 6. Fotos del proceso de vermicomposta en la Estación Experimental Agrícola de Adjuntas.



Figura 7. Fotos de la pulpa de café en la Estación Experimental Agrícola, Beneficiado y Charca de Lixiviado en vertedero de Puerto Rico.

APÉNDICES