

MODELO DE GESTIÓN PARA EL MANEJO DEL SISTEMA DE EXTRACCIÓN, DESHIDRATACIÓN Y DISPOSICIÓN FINAL DE LODOS DE LAGUNAS DE ESTABILIZACION

Tesis de Maestría en Gestión Ambiental

**GALO DURAZNO ORELLANA
JAVIER DÍAZ TORRES**

**DIRECTOR:
ING. ALFONSO NEIRA ALVARADO, MSc.**



Av. 24 de Mayo 7-77 y Hernán
Malo

Teléfono: (593 7) 2881 333
Fax: (593 7) 2815 997
www.uazuay.edu.ec



Tabla de contenidos

Resumen	1
Abstract	1
1	Introducción 2
2	Metodología 5
2.1	Descripción de la PTAR Ucubamba 5
2.1.1	Ubicación 5
2.1.2	Descripción del proceso de tratamiento de aguas residuales 5
2.1.3	Características de las aguas residuales 6
2.1.4	Descripción del sistema de extracción y deshidratación de lodos 7
2.2	Análisis de datos históricos 8
2.3	Caracterización estratigráfica 8
2.4	Determinación experimental de la dosis optima de polielectrolito para deshidratación 9
2.5	Determinación experimental de ocupación del relleno sanitario 11
2.6	Modelo de gestión 12
2.6.1	Normativa 14
2.6.2	Características del lodo crudo (estratigrafía) y deshidratado 14
2.6.3	Costos de transporte y disposición final del lodo deshidratado 15
2.6.4	Requerimientos de infraestructura 15
2.6.5	Disponibilidad y aptitud de terrenos en el área de influencia económica del proyecto 15
3	Resultados y discusión 16
3.1	Análisis de datos históricos 16
3.2	Caracterización estratigráfica 19
3.3	Determinación experimental de la dosis optima de polielectrolito para deshidratación 25
3.4	Determinación experimental de ocupación del relleno sanitario 32
3.5	Modelo de gestión 33
3.5.1	Costos de transporte y requerimientos de infraestructura 33
3.5.2	Disponibilidad y aptitud de terrenos en el área de influencia económica del proyecto 34
	Área de influencia económica 34
	Macronutrientes disponibles en el lodo 35
	Uso del suelo y cobertura vegetal en el área de influencia económica del proyecto 39
4	Conclusiones 43
4.1	Análisis de datos históricos 43
4.2	Caracterización estratigráfica 43
4.3	Determinación experimental de la dosis optima de polielectrolito para deshidratación 43
4.4	Determinación experimental de ocupación del relleno sanitario 44
4.5	Modelo de Gestión 45
	Agradecimientos 45
	Bibliografía 46

Lista de figuras

	TÍTULO	Página
Figura 1	Ubicación geográfica de la ciudad de Cuenca y de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	5
Figura 2	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la ciudad de Cuenca	6
Figura 3	Sistema previsto para la extracción, conducción, bombeo, espesamiento y deshidratación de lodos	8
Figura 4	Secuencia de la extracción de muestras estratigráficas	9
Figura 5	Filtro prensa para deshidratación de lodos	11
Figura 6	Polielectrolito empleado en las pruebas experimentales	11
Figura 7	Diagrama de las pruebas de deshidratación	10
Figura 8	Muestras de lodo deshidratado en proceso de desecamiento natural	11
Figura 9	Reactores experimentales	12
Figura 10	Lodo deshidratado y desechos sólidos para llenado de reactor	12
Figura 11	Diagrama para las pruebas experimentales de ocupación del relleno sanitario	13
Figura 12	Variabilidad de Coliformes Totales en el lodo – Clasificación por unidad de tratamiento	18
Figura 13	Variabilidad de Coliformes Termotolerantes en el lodo – Clasificación por unidad de tratamiento	18
Figura 14	Variación de la concentración de sólidos totales en el estrato de lodos	19
Figura 15	Variabilidad de la concentración de N. Orgánico en el estrato de lodos	21
Figura 16	Variabilidad de la concentración de NKT en el estrato de lodos	21
Figura 17	Variabilidad en la densidad de coliformes totales en el estrato de lodos	22
Figura 18	Valores promedio obtenidos en los diferentes estrato	22
Figura 19	Variabilidad de la densidad de coliformes termotolerantes en el estrato de lodos	23
Figura 20	Valores promedio obtenidos en los diferentes estratos	23
Figura 21	Variabilidad de la concentración de ST en función de la dosis de polielectrolito aplicada	25
Figura 22	Consistencia del lodo deshidratado	29
Figura 23	Detalle de lodo deshidratado	29
Figura 24	Agua de escurrido del proceso de deshidratación	30
Figura 25	Toma de muestras para determinación de parámetros físicos	30
Figura 26	Pérdida de peso en el proceso de post-deshidratación	31
Figura 27	Variación de peso entre la muestra inalterada y agitada	32
Figura 28	Muestras de lodo deshidratado en desecamiento natural una vez transcurridos 82 días	32
Figura 29	Reactores experimentales una vez concluida la fase de llenado	33
Figura 30	Unidades experimentales cubiertas y en proceso de evaluación	33
Figura 31	Costo mínimo de transporte, disposición final e infraestructura	34
Figura 32	Área económica del proyecto	35
Figura 33	Cantones en el área de influencia del proyecto	35
Figura 34	Variación de la cobertura del suelo. Años 1991 y 2001	40
Figura 35	Pendiente y modelo digital del terreno en el área de influencia del proyecto	40
Figura 36	Modelo de gestión técnico, económico y ambiental de los lodos deshidratados de la PTAR Cuenca	42

Lista de tablas

	TÍTULO	Página
Tabla 1	Concentraciones medias ponderadas anuales en el afluente	7
Tabla 2	Concentraciones medias ponderadas anuales en el efluente	7
Tabla 3	Peso de desechos sólidos y lodo deshidratado en cilindros experimentales	12
Tabla 4	Características físicas, químicas y biológicas del estrato superior de lodos	18
Tabla 5	Características físicas, químicas y biológicas del estrato de lodos de la Laguna Facultativa 1	24
Tabla 6	Características físicas, químicas y biológicas en el lodo crudo y deshidratado	28
Tabla 7	Características físicas, químicas y biológicas en el agua de escurrido	29
Tabla 8	Relaciones en el agua de escurrido	30
Tabla 9	Costo mínimo de transporte, disposición final e infraestructura	34
Tabla 10	Macronutrientes disponibles en el lodo	36
Tabla 11	Peso y volumen de lodo deshidratado a ser aplicado en el sector agrícola en función del macronutriente limitante	38
Tabla 12	Cobertura del suelo. Años 1991 y 2001	39

Modelo de gestión para el manejo del sistema de extracción, deshidratación y disposición final de lodos de lagunas de estabilización

Durazno, G.¹ y Díaz, J.¹

¹ Funcionarios de la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca, calle Benigno Malo 7-78 y Sucre, Cuenca, Ecuador,
e-mail: gdurazno@etapa.net.ec; jdiaz@etapa.net.ec

Resumen

Tradicionalmente en la conceptualización y diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante Lagunas de Estabilización, la generación y acumulación de lodos en el sistema ha ocupado un rol secundario, concepto sustentado básicamente en el prolongado tiempo de almacenamiento, a la digestión y a los volúmenes a evacuar. En los diseños de la PTAR de Ucubamba, Cuenca se previó la evacuación de los lodos en períodos de cinco años, sin embargo la carencia de información relacionada con las características de lodo de sistemas de Lagunas de Estabilización, en su tiempo, no permitió efectuar un análisis holístico de la problemática que podría representar a futuro su gestión.

En la actualidad ETAPA se encuentra implementando un sistema para el dragado, deshidratación mecánica y disposición final de los lodos, por lo que es necesario desarrollar el conocimiento de las particularidades del material acumulado en el sistema, con base en los diferentes factores relacionados con las características de las aguas residuales, su tratamiento en la PTAR y las operaciones a efectuarse para su tratamiento y disposición, lo cual sumado a la información histórica, permitirá a la Empresa, un manejo técnico-económico y ambiental mediante el modelo desarrollado en la presente investigación.

Para la consecución de este fin, se efectuó un análisis de las características de los lodos acumulados en las diferentes unidades del proceso y de su variación en función de su estratigrafía; la mejor alternativa de acondicionamiento para su deshidratación y la incidencia de los escurridos en el tratamiento de la fase líquida; las variables y condicionantes ligados con su disposición, y, la optimización de recursos económicos para las diferentes fases del sistema previsto.

Los resultados obtenidos, evidencian las limitadas concentraciones de macronutrientes y metales pesados en el lodo crudo, su bajo poder agronómico y el avanzado grado de mineralización en todo su estrato, así como el conocimiento de las características del lodo una vez deshidratado, y los cuidados a considerar para su uso debido al potencial riesgo ligado con sus características biológicas. Se ha verificado la posibilidad de alcanzar los estándares previstos en la Legislación Ecuatoriana para la co-disposición, la baja incidencia en la ocupación del relleno sanitario, y se han obtenido parámetros operativos y alternativas, que permitirán a ETAPA, optimizar la operación del sistema, disminuir el egreso de recursos económicos y gestionar de forma ambientalmente segura el sistema en su totalidad.

Abstract

Traditionally, in the planning of Wastewater treatment facilities using stabilization ponds, the sludge generation and their accumulation in the process units, has been considerate a secondary issue, because some facts like large time of storage, digestion and quantity to evacuate. In the designs of the Ucubamba Wastewater Treatment facilities, it was forecasting in periods of five years, but the acknowledge of the sludge characteristics of stabilization ponds doesn't permit an holistic analysis of the problem and its management.

Actually, ETAPA is executing a project for dredging, mechanical dehydration and final dispose of the sludge accumulate in the Ucubamba Wastewater treatment facilities, and it is necessary to study the characteristics of the sludge, basis on the type of the wastewater, their treatment and the process to treat and dispose the sludge, that add to the historical information enable to ETAPA to make a technical, economical and environmental management.

To make this possible, this research analyses the characteristics of the sludge accumulate in the different ponds units and their level variation; the best alternative to conditioning for dredging and the influence of the water drain for the treatment of the liquid component; the variable and facts joined to the final dispose and the optimization of economical resources for the different stages of the forecast facilities.

The results of the research make evident the small quantity of macro nutrients and metals in the sludge, its agronomical power and the great mineralization stage, and the sludge characteristic after dehydration process and the facts to be considered if it pretends to be used due its biological characteristics. It has been verified the different options to reach the National standards for the co-disposal, the minimum occupation of the sanitary landfill facilities, and it has been obtained operative parameters to be able to ETAPA for optimize de system operation, and to get save economical resources and an environmental manage of the system.

Palabras clave

Lagunas de estabilización; aeradas; facultativas; lodos; deshidratación; estratigrafía

1 Introducción

La preocupación en cuanto al estudio de las características del biosólido de lagunas es muy reciente, por eso son pocas las informaciones disponibles (Tomoyuki et al., 2002), por lo que el desarrollo de un modelo de gestión para el manejo de los lodos del proceso de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales –PTAR- de la ciudad de Cuenca constituye un aporte técnico importante en el área, fundamentalmente porque en su constitución se conjugan factores relacionados con: características del agua residual; el proceso empleado para el tratamiento de la fase líquida; el tipo de alcantarillado predominante; la ubicación geográfica de la ciudad; condiciones meteorológicas; y, el tratamiento conjunto con las aguas residuales industriales.

Cuenca ha sido históricamente caracterizada como una de las ciudades con los mejores servicios públicos en el Ecuador. En el año de 1985, la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca – ETAPA -, inició un proceso de planificación tendiente a la recuperación de la calidad del agua de los ríos que la atraviesan, que luego de diagnósticos y estudios concluyó en una primera etapa, con la construcción de una red de interceptores marginales y la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, la cual se constituye en la instalación de mayor importancia en su tipo en el país y una de las principales de Sudamérica. La PTAR inició su funcionamiento a finales del año 1999, y está constituida por Lagunas de Estabilización en dos series, compuesta cada una por una laguna aerada primaria, una facultativa secundaria y una de maduración terciaria con un área de espejo de agua de 45 ha y una capacidad de tratamiento de 1860 l/s.

La intercepción, conducción y tratamiento de las aguas residuales que anteriormente eran vertidas a los ríos y los problemas de contaminación que ocasionaban en todo el cauce de los cuerpos receptores, constituyen un conflicto que actualmente se concentra en la PTAR, y que lo constituyen los lodos depositados en el sistema de tratamiento, teniéndose proyectado hasta el presente un volumen acumulado superior a los 180000 m³ (al 13%ST) en éstos nueve años de funcionamiento. La acumulación de este material se encuentra ocasionando problemas relacionados con la disminución de los períodos de retención lo cual ha originado una pérdida de la eficiencia del sistema y mayores costos en la operación debido a la demanda bentónica.

Para solventar esta situación, ETAPA lleva adelante un proyecto para complementar el sistema de tratamiento de aguas residuales y así recuperar la capacidad de depuración, mediante la implementación de un sistema de extracción, deshidratación y disposición final de lodos. Para esta última, como alternativa principal, está prevista la co-disposición con los residuos sólidos urbanos en el relleno sanitario.

Se han efectuado trabajos previos tendientes a determinar alternativas de procesamiento y destino final, Alternativa de Uso de los Lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (ETAPA) en Cerámica (Galarza y Román, 2003), Drying of Stabilization Pond Sludge and its Quality for Reuse in Land Application (Alvarado, 2005), Disposición Final de los Lodos de las Plantas Potabilizadoras y Depuradora de ETAPA (ETAPA, 2007) y Estudio de Alternativas para el Transporte de Lodos Deshidratados desde la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba hasta el Relleno Sanitario de Pichacay (ETAPA, 2008a). Por otro lado hace más de seis años se inició con la toma de muestras y análisis de los lodos crudos depositados en el estrato superior del manto de lodo en las Lagunas Aeradas y Facultativas de la PTAR.

Con estos antecedentes, la presente investigación, tiene como objetivo, formular un modelo de gestión que integre el análisis y sistematización de la información desarrollada referente a las características químicas y biológicas de los lodos en cada una de las lagunas y en sus diferentes estratos, la determinación de variables técnicas que permitan optimizar el sistema de extracción, deshidratación y transporte de lodos previsto por ETAPA, y la incidencia de la masa en el relleno sanitario. Toda la información generada, se ha integrado un modelo de gestión técnico, económico y ambiental, el cual ha sido desarrollado teniendo como premisa: evitar daños o efectos adversos al ambiente y a la población, así como una adecuada gestión de los recursos económicos necesarios para el funcionamiento del sistema, habiéndose incluido en su formulación la optimización de la disposición final buscando como alternativa viable el sector agrícola. Un análisis socio-económico de esta aplicación es imprescindible para la consecución de logros, así como una evaluación técnica a profundidad que involucre factores relacionados con la geología, información actualizada de los usos del suelo, cultivos y vías de acceso, costos de fertilizantes agroquímicos y su disponibilidad, y levantamiento y ubicación captaciones de agua para los centros poblados y sus cuencas de aporte para el establecimiento de restricciones de zonas de uso.

Fundamentos teóricos

El proceso de urbanización observado en todo el mundo favorece la formación de grandes áreas metropolitanas, que acaban imponiendo límites en las alternativas de procesamiento y disposición final del lodo. Independientemente de la tecnología adoptada, todos los procesos de tratamiento y disposición de lodo presentan ventajas y desventajas, muchas de éstas relacionadas a la posibilidad de contaminación del suelo, cuerpos receptores y a la atmósfera misma (Luduvic y Fernandez, 2001).

El proceso de tratamiento separa las impurezas presentes en las aguas residuales, produciendo lodos aún en forma líquida representando cerca de 1% a 2% del volumen del agua residual tratada (von Sperling y Andreoli, 2001; Tomoyuki, 2002), su gerenciamiento es bastante complejo y tiene un costo generalmente entre un 20% a 60% del total del gasto con relación a la operación de una estación de tratamiento de aguas residuales (Fernández et al., 2001; von Sperling y Andreoli, 2001). Justamente por representar un porcentaje considerable del costo de operación, la selección de una alternativa de procesamiento y destino final del lodo debe ser parte integrante del proyecto de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (Fernández et al., 2001). El tratamiento de la fase sólida es responsable en una PTAR de aproximadamente el

40% de los costos de implantación, 50% de los costos de operación y por el 90% de los problemas operacionales (Miki et al., 2002).

El tratamiento de aguas residuales genera residuos, como arena, desechos sólidos de cribas y lodo, los cuales pueden ser tan o más impactantes que las propias aguas residuales. Estos residuos, cuando no son tratados y adecuadamente dispuestos, constituyen una permanente amenaza a la salud pública y al medio ambiente (de Lara et al., 2001). El gerenciamiento de lodo de aguas residuales proveniente de estaciones de tratamiento es una actividad de gran complejidad y alto costo, que, si fuere mal ejecutada, puede comprometer los beneficios ambientales y sanitarios esperados de éstos sistemas (von Sperling y Andreoli, 2001).

La rentabilización de los fangos es generalmente problemática, y su evacuación constituye casi siempre una carga de explotación considerable. En el aspecto económico, el único fin que interesa es, en realidad, limitar los gastos de explotación de su tratamiento (mano de obra, reactivos, energía eléctrica o calorífica, transporte, etc). Paralelamente, la higiene del trabajo y la protección del ambiente exigen soluciones que provoquen el mínimo de molestias al precio, a veces, de un incremento de los costos (Degremont, 1979).

Estaciones de tratamiento de aguas residuales tienen la finalidad básica de separar estas dos fases, retornando el agua para los cuerpos hídricos de la región y procesando la fase sólida, de modo de permitir su disposición de manera económica, segura en términos de salud pública y ambientalmente aceptable. Esta fase sólida contiene todos los contaminantes provenientes de las actividades, de los hábitos alimenticios y del nivel de salud de la población atendida por las redes colectoras de aguas residuales. Por lo tanto, el lodo retrata exactamente las características de la comunidad y puede variar sustancialmente con el tiempo y con la capacidad de remoción de la estación de tratamiento. Uno de los constituyentes más preocupantes son los microorganismos patógenos. Bacterias, virus, protozoarios, parásitos intestinales y sus huevos están presentes en los lodos de aguas residuales, y una significativa parte de ellos son causantes de enfermedades. La cantidad de patógenos encontrados en el lodo es inversamente proporcional a las condiciones sanitarias de la población atendida, por tanto, cuanto mayor es el nivel de ocurrencia de enfermedades de origen hídrico en la comunidad, mayor cuidado sanitario es necesario, principalmente cuando la ruta de disposición utilizada es el reciclaje agrícola (Teixeira, 2001). Apenas son aceptables para el reciclaje agrícola los lodos que no impliquen en riesgos sanitarios y ambientales para el suelo, productos agrícolas, salud humana y al medio ambiente en general (da Silva et al., 2001).

La legislación para disponer adecuadamente los biosólidos debe ser específica de acuerdo con las condiciones ambientales, sociales y económicas de cada región o país. Los parámetros internacionales deben servir de referencia, con todo deben ser validados a través de resultados experimentales que consideren las particularidades regionales, tales como el nivel y tipo de industrialización, el perfil sanitario de la población y las características pedológicas regionales (dos Santos, 2001).

2 Metodología

2.1 Descripción de la PTAR Ucubamba

2.1.1 Ubicación

La ciudad de Cuenca, capital de la provincia del Azuay, es una ciudad interandina situada al sur del Ecuador sobre una planicie a 2550 m s.n.m., con una temperatura media anual de 15°C y una población de 300000 habitantes. La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales se localiza al noreste de la ciudad en el sector de Ucubamba (*Fig. 1*).

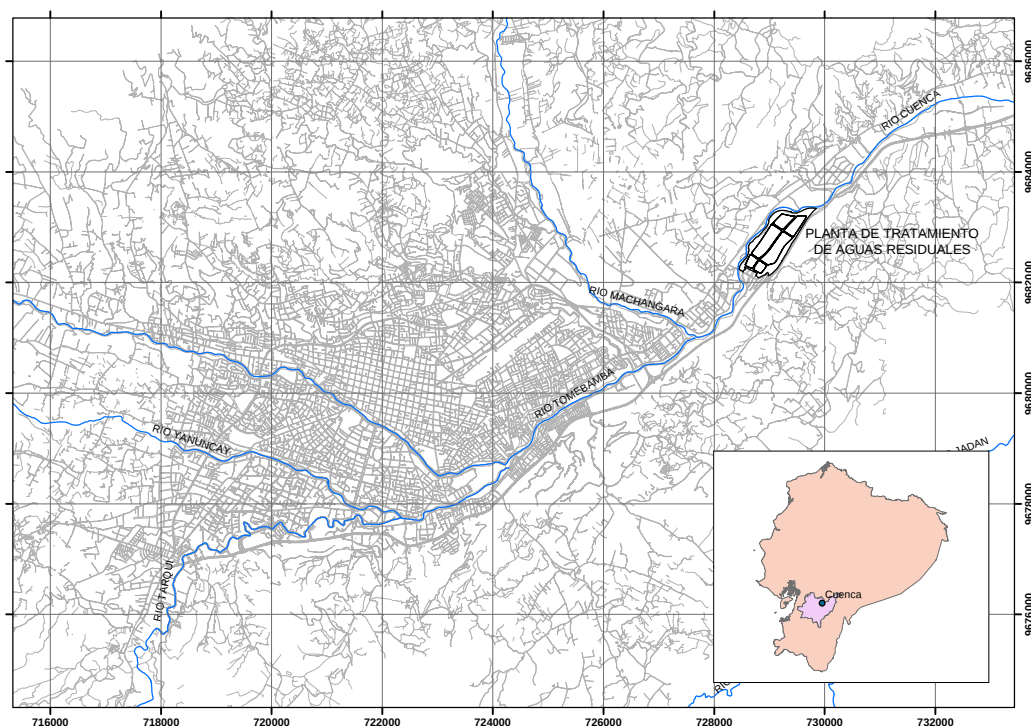


Figura 1: Ubicación geográfica de la ciudad de Cuenca y de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (UDA - COPOE, 2004. Centros Poblados de la Cuenca del Río Paute. Escala 1:25 000, Fuente: UMACPA 1996, Universidad del Azuay. Cuenca, Ecuador; UDA - COPOE, 2003. Limite Geográfico del Ecuador. Escala 1:250 000, Fuente: ODEPLAN 2002, periodo 2000- 2002, Universidad del Azuay. Cuenca, Ecuador; UDA - COPOE. Ríos Principales de la Cuenca del Río Paute. Escala 1: 25 000. Universidad del Azuay. Cuenca, Ecuador)

2.1.2 Descripción del proceso de tratamiento de aguas residuales

La línea de proceso está constituida por estructuras de tratamiento preliminar y dos módulos de tratamiento independientes compuestos por Lagunas de Estabilización, disponiéndose en cada serie de una laguna aerada primaria, una laguna facultativa secundaria y una laguna de maduración terciaria (*Fig. 2*). El efluente tratado es descargado hacia el río Cuenca.

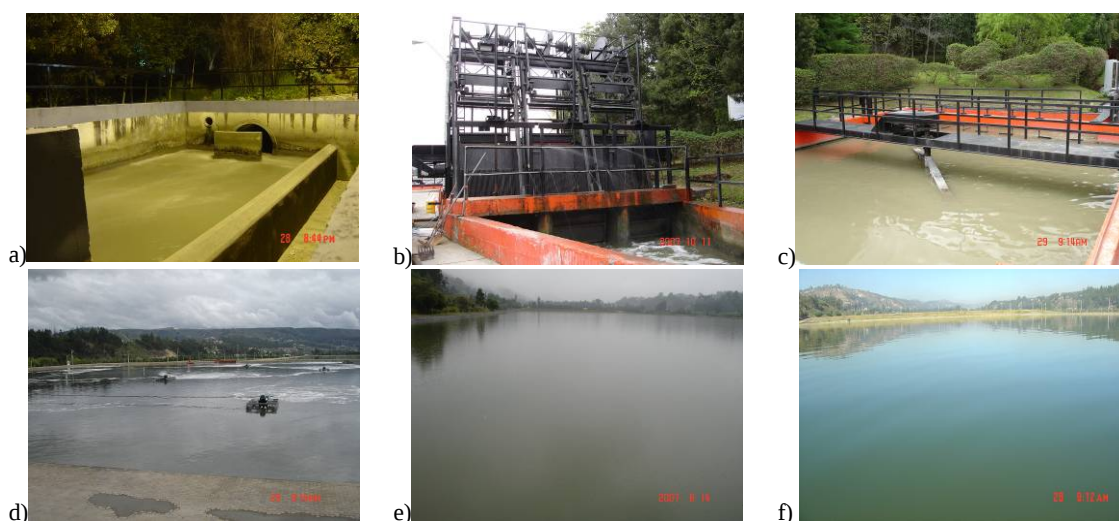


Figura 2: Vista Panorámica de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la ciudad de Cuenca. a) Cajón de recepción, b) Cribas mecánicas, c) Desarenadores, d) Lagunas Aeradas, e) Lagunas Facultativas, f) Lagunas de Maduración

2.1.3 Características de las aguas residuales

Desde el año de 1999 se ha mantenido un programa de control de la calidad del agua residual en el afluente (*Tabla 1*) y efluente final (*Tabla 2*) de la PTAR, con la finalidad de identificar las características físico-químico y biológicas de las aguas residuales, que determinan las variables operativas y de funcionamiento del sistema, y que tienen influencia directa en la calidad del lodo acumulado en el sistema.

Parámetro	Unidad	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Caudal	l/s	1330	1143	1251	1253	1094	1151	1119	1208
DBO	mg/l	71	77	80	93	111	93	100	97
DQO	mg/l	226	246	227	224	259	219	248	240
SS Totales	mg/l	150	147	136	148	146	159	144	150
S. Sedimentables	ml/l	3,50	3,60	4,06	3,92	3,87	3,40	3,12	2,87
N. Amoniacal	mg/l	6,7	8,2	8,5	8,3	9,3	8,0	10	9,5
N. Orgánico	mg/l	7,5	9,0	8,8	8,1	7,2	6,7	8,3	7,4
Fósforo	mg/l	5,2	4,9	4,5	4,6	5,5	4,8	5,6	5,6
SS Hexano	mg/l	38	29	24	27	27	18	23	30
C. Termotolerantes	NMP/100 ml	2,38E+07	1,87E+07	1,29E+07	1,36E+07	1,10E+07	1,16E+07	1,46E+07	8,24E+06
Parásitos	Nº/l	36	32	20	21	10	5,4	3,7	4,6
Aluminio	µg/l	1886	1274	< 1022	< 1425	1415	1169	1063	994
Cromo	µg/l	< 36	< 28	< 10	< 7,5	< 6,0	< 6,5	< 7,8	< 4,1
Cobre	µg/l	< 48	< 22	< 17	25	< 18	22	< 33	21
Níquel	µg/l	< 27	< 28	< 20	17	18	< 16	< 17	< 16
Zinc	µg/l	< 188	< 122	< 122	< 130	109	133	106	113
Plomo	µg/l	< 64	< 25	< 17	< 20	< 18	< 26	< 33	< 32
Cadmio	µg/l	< 2,7	< 0,76	< 0,72	< 1,5	< 5,1	< 3,0	< 5,5	< 4,4

Tabla 1: Concentraciones medias ponderadas anuales en el afluente (ETAPA, 2008)

Parámetro	Unidad	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
DBO Total	mg/l	15	15	15	18	21	19	21	18
DBO Soluble	mg/l	5,1	4,8	4,8	5,3	6,3	6,5	5,9	5,5
DQO Total	mg/l	86	97	100	99	101	90	92	75
DQO Soluble	mg/l	35	37	39	41	41	43	41	39
SS Totales	mg/l	38	48	38	31	33	30	32	23
S. Sedimentables	ml/l	0,22	0,34	0,39	0,16	0,11	0,12	0,09	0,05
N. Amoniacal	mg/l	8,1	12	12	12	13	13	15	13
N. Orgánico	mg/l	4,7	5,1	5,1	4,6	4,0	4,3	4,9	4,2
Fósforo	mg/l	2,3	2,5	2,2	2,2	2,6	2,4	2,9	2,7
SS Hexano	mg/l	15	12	9,1	13	8,7	6,4	8,7	12
C. Termotolerantes	NMP/100 ml	5,07E+03	5,27E+03	8,96E+03	1,02E+04	1,12E+04	4,19E+03	7,48E+03	1,10E+04
Parásitos	Nº/l	0,11	0,40	0,13	0,07	0,03	0,01	0,00	0,00
Aluminio	µg/l	< 249	< 417	< 242	178	< 315	< 160	< 129	182
Cromo	µg/l	< 14	< 18	< 7,0	< 4,5	< 3,9	< 4,2	< 4,8	< 3,9
Cobre	µg/l	< 29	< 8,9	< 11	< 15	< 8,7	< 6,9	< 20	< 9,0
Níquel	µg/l	< 26	< 22	< 17	< 15	< 13	< 12	< 15	< 12
Zinc	µg/l	< 100	< 46	< 71	< 66	< 37	45	48	61
Plomo	µg/l	< 34	< 15	< 16	< 60	< 17	< 13	< 21	< 19
Cadmio	µg/l	< 2,7	< 0,51	< 1,1	< 1,3	< 2,5	< 2,0	< 4,3	< 3,2

Tabla 2: Concentraciones medias ponderadas anuales en el efluente (ETAPA, 2008)

2.1.4 Descripción del sistema de extracción y deshidratación de lodos

La línea de proceso prevista para la extracción y deshidratación de los lodos (Fig. 3) se encuentra constituida por: a) Extracción y bombeo inicial de lodos sedimentados mediante un sistema de dragas, b) Recolección y transporte de lodos mediante un sistema de tuberías situadas en la periferia de las lagunas aeradas y facultativas, c) Bombeo de lodos recolectados desde estaciones auxiliar y principal, d) Tamizado de lodos en canales de cribado, e) Espesamiento de lodos en dos unidades de gravedad, f) Bombeo de lodos espesados, g) Acondicionamiento del lodo mediante dosificación de polielectrolito, h) Deshidratación en filtros de banda, i) Bombeo y almacenamiento de lodos deshidratados a silo, y j) Transporte y disposición final en relleno sanitario. El sistema a implementar, dispone de la suficiente versatilidad para facilitar la modificación de la distribución temporal de las cantidades de lodos a extraer durante las labores diarias.

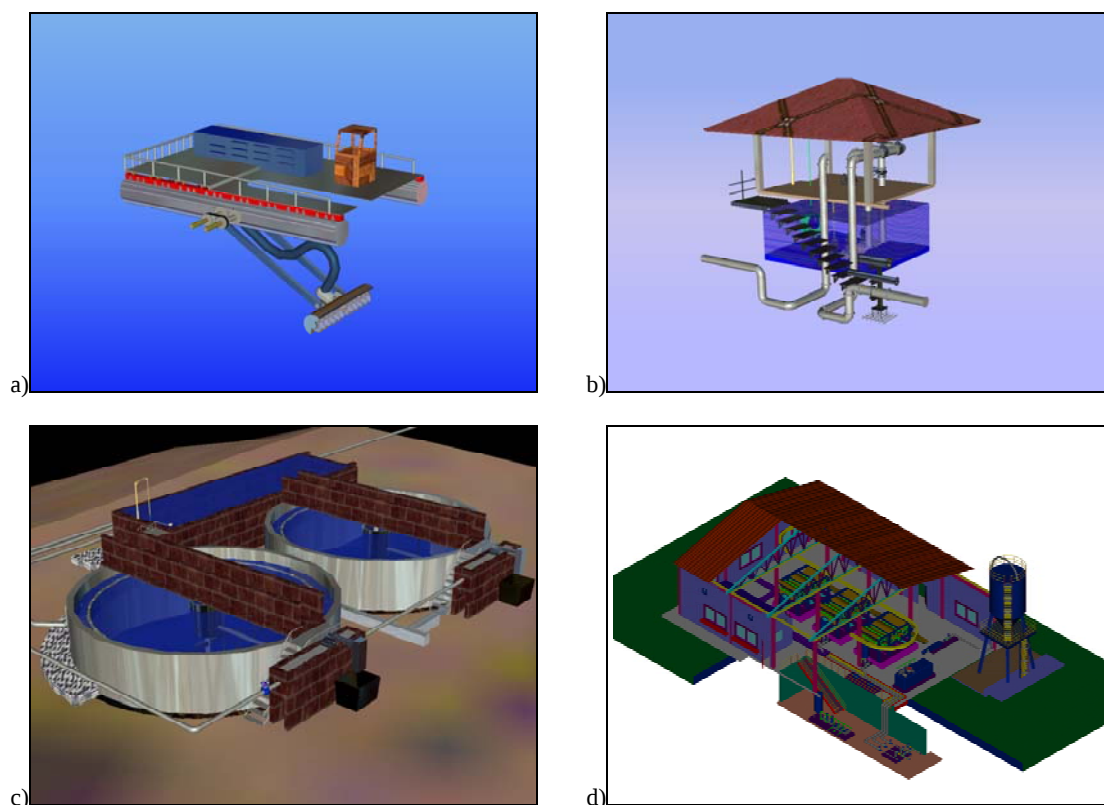


Figura 3: Sistema previsto para la extracción, conducción, bombeo, espesamiento y deshidratación de lodos. a) Dragado, b) estaciones de bombeo, c) unidades de espesamiento, d) edificio de deshidratación y silo de almacenamiento de lodo deshidratado

La concentración prevista en el lodo deshidratado es de 25% ST (ETAPA, 2004), y el peso diario de lodo a evacuar es de 57,48 t considerándose operación continua (365 días por año), y 83,93 t para un período de 250 días por año.

2.2 Análisis de datos históricos

El análisis de datos históricos se circunscribió a los resultados obtenidos desde el año 2002 hasta el año 2006, en cinco muestras en la Laguna Aerada 1, siete muestras en la Laguna Aerada 2, ocho muestras en la Laguna Facultativa 1 y seis muestras en la Laguna Facultativa 2. En su momento todas las muestras fueron tomadas desde la capa superior del estrato de lodos mediante el empleo de una draga Eckman. Los datos han sido analizados en función de cada unidad del proceso y de manera global, con la finalidad de determinar parámetros particulares y generales del sistema en su conjunto.

2.3 Caracterización estratigráfica

La extracción de muestras se efectuó en la Laguna Facultativa 1 durante seis meses, habiéndose extraído un total de seis muestras. El procedimiento empleado (*Fig. 4*) consistió en: a) Verificación de los niveles de agua y lodo en el punto de toma de muestra, b) calibración del equipo de muestreo para la extracción a la profundidad determinada, c) extracción de la muestra de cada uno de los tres estratos previamente establecidos, y d) llenado de recipientes y entrega a laboratorio.



Figura 4: Secuencia de la extracción de muestras estratigráficas. a) extracción de lodo, b) acopio de muestras de lodo de las diferentes profundidades de Laguna Facultativa 1, c) llenado de frascos para determinación de parámetros físicos, químicos y parasitarios, y d) entrega, etiquetado e identificación de muestras en laboratorio

2.4 Determinación experimental de la dosis optima de polielectrolito para deshidratación

Las pruebas de deshidratación se efectuaron con lodo procedente de la Laguna Facultativa 1, durante seis meses, habiéndose efectuado un total de seis pruebas experimentales. Los trabajos fueron ejecutados en un filtro prensa experimental con un volumen de operación de 8 L (Fig. 5) y se emplearon dosis de polielectrolito catiónico de 2 kg/t, 3 kg/t, 4 kg/t y 5 kg/t (Fig. 6) en una concentración del 0,2% en cada una de las pruebas; habiéndose efectuado análisis de laboratorio en la muestra de lodo crudo, en cada una de las muestras de lodo deshidratado y en cada una de las muestras del agua de escurrido del proceso de deshidratación. El procedimiento utilizado (Fig. 7) consistió en: a) extracción de la muestra de la capa superficial de lodo y análisis de ST, STV y densidad, b) cálculos de gabinete para el acondicionamiento de la muestra a los parámetros operativos previstos y la cantidad de polielectrolito a ser empleada en cada una de las pruebas experimentales, c) acondicionamiento de la muestra al contenido de ST (8%) proyectado en el efluente del espesador, d) llenado de recipientes de dosificación con lodo y polielectrolito, e) prensado y recolección del agua de escurrido, f) extracción de lodo deshidratado de cada una de las celdas, y g) llenado de recipientes con muestras de lodo deshidratado y agua de escurrido y entrega a laboratorio.



Figura 5: Filtro prensa para deshidratación de lodos



Figura 6: Polielectrolito empleado en las pruebas experimentales

Durante el desarrollo del trabajo experimental, se identificó la oportunidad de extender la investigación al estudio de un proceso de post-deshidratación, mediante el desarrollo de una fase experimental consistente en el desecamiento natural, para lo cual se elaboraron dos sets de muestras cada uno compuesto de 20 recipientes de 170 cm³ en los cuales se efectuó una medición diaria de peso y semanalmente se determinó los ST y los STV. La finalidad perseguida con la elaboración de estos conjuntos, fue determinar la incidencia del grado de mezcla en la pérdida de peso, por lo que en uno de ellos se ha efectuado la agitación diaria de la masa. Esta alternativa podría disminuir los egresos económicos por transporte y disposición final de los lodos deshidratados.



Figura 8: Muestras de lodo deshidratado en proceso de desecamiento natural. a) muestras inalteradas, y b) muestras agitadas

2.5 Determinación experimental de ocupación del relleno sanitario

Se instalaron dos reactores experimentales de 0,60 m de lado y 2,65 m de altura (igual a la de las celdas del relleno sanitario de la ciudad de Cuenca) (Fig. 9), para de esta forma proceder al llenado con desechos sólidos en el primer caso, y con desechos sólidos y lodo deshidratado en la proporción en peso más desfavorable en el segundo caso (4,8:1) (dentro del rango recomendado por la EPA). La determinación de la cantidad requerida, ha sido llevada considerando una producción diaria en la ciudad de 405,83 t (EMAC, 2008) para los desechos sólidos y de 83,93 t/día a un 25% ST para el lodo deshidratado (ETAPA, 2004). El lodo deshidratado utilizado ha sido obtenido mediante el empleo de la dosis óptima de polímero resultante de las pruebas de

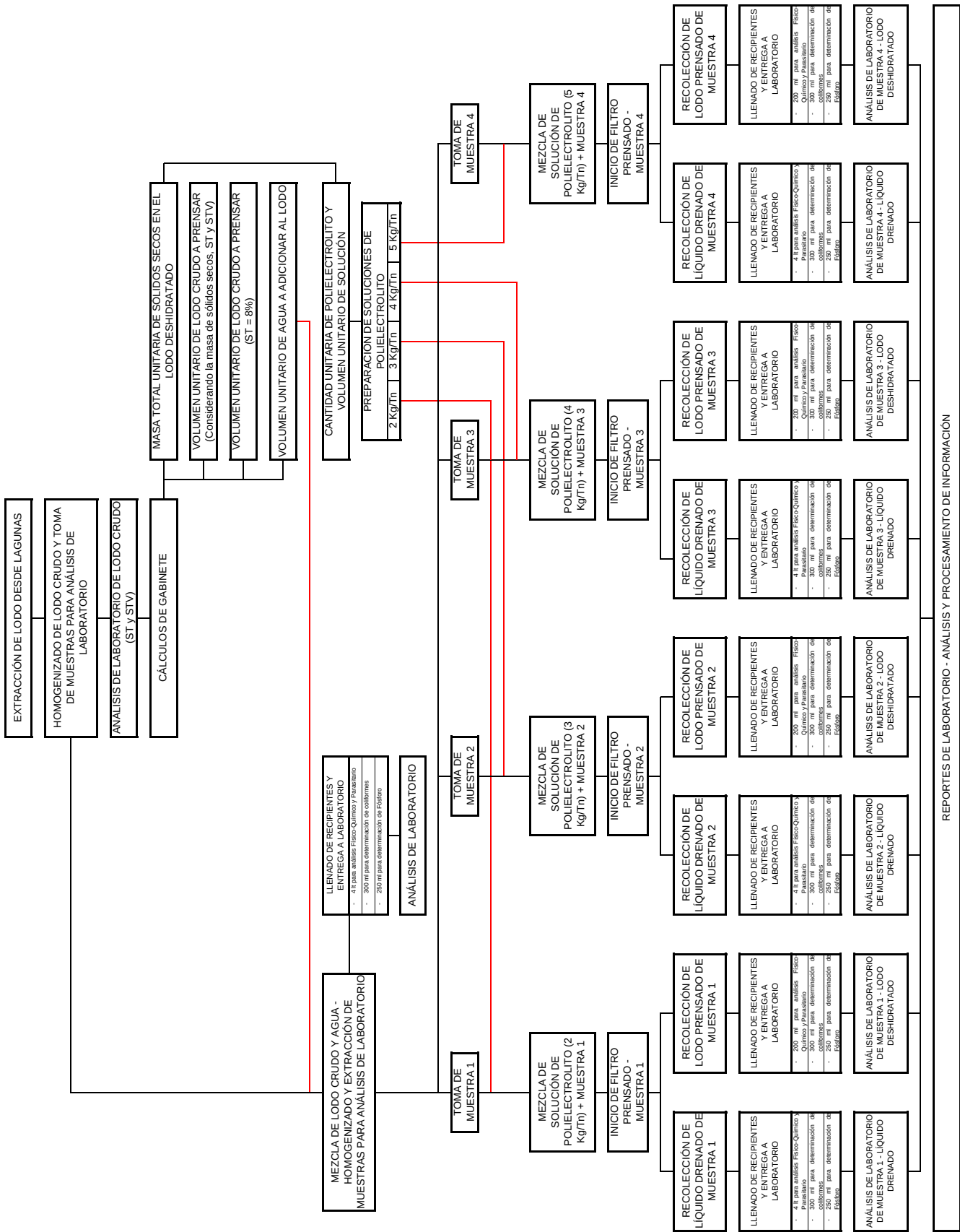


Figura 7: Diagrama para la ejecución de las pruebas de deshidratación

deshidratación. La secuencia (Fig. 11) del ensayo ha sido: a) Caracterización física de los desechos sólidos, b) obtención de lodo deshidratado, c) llenado del cilindro experimental con desechos sólidos, y d) llenado del cilindro experimental con desechos sólidos y lodo. Cada uno de los reactores se encuentra dotado de una capa de cobertura inferior y superior, un sistema de drenaje y recolección de lixiviados, y ha sido llenado en capas sucesivas de 0,20 m de tal forma de ir compactando adecuadamente y así obtener el grado de compactación que se alcanza en el relleno sanitario y que es de 750 kg/m³.

En la Tabla 3 se resumen, los pesos de desechos sólidos y lodo deshidratado empleados para el llenado de cada uno de los reactores experimentales.

PARÁMETRO	PESO
Peso total de desechos sólidos – Reactor 1:	740 kg
Peso total de lodo deshidratado – Reactor 2:	127 kg
Peso total de desechos sólidos – Reactor 2:	613 kg
Peso total (desechos sólidos + lodo) - Reactor 2:	740 kg

Tabla 3: Peso de desechos sólidos y lodo deshidratado en cilindros experimentales



Figura 9: Reactores experimentales. a) reactores experimentales previo a llenado, y b) llenado de reactor con desechos sólidos



Figura 10: Lodo deshidratado y desechos sólidos para llenado de reactor

2.6 Modelo de gestión

El modelo de gestión técnico, económico y ambiental de los lodos deshidratados de la PTAR Cuenca, ha sido concebido bajo la perspectiva de evitar ó mitigar daños o efectos adversos al ambiente y a la población, así como una adecuada gestión de recursos. Su formulación considera la optimización de la disposición final buscando una alternativa viable dentro del sector agrícola que permita reducir los volúmenes a ser gestionados a través del sistema de disposición final ya definido por la Empresa, que corresponde a la co-disposición de los lodos con los desechos sólidos en el relleno sanitario de la ciudad, lo cual permitirá cumplir las premisas planteadas para el modelo.

En su formulación se incluyen los siguientes aspectos o variables: normativa, características del lodo crudo (composición estratigráfica) y deshidratado, pesos y volúmenes, costo de transporte y disposición final, requerimientos de infraestructura, y la disponibilidad y aptitud de los terrenos en el área de influencia económica del proyecto. El modelo incluye hitos de monitoreo y control que permitan asegurar la calidad en la gestión del proyecto.

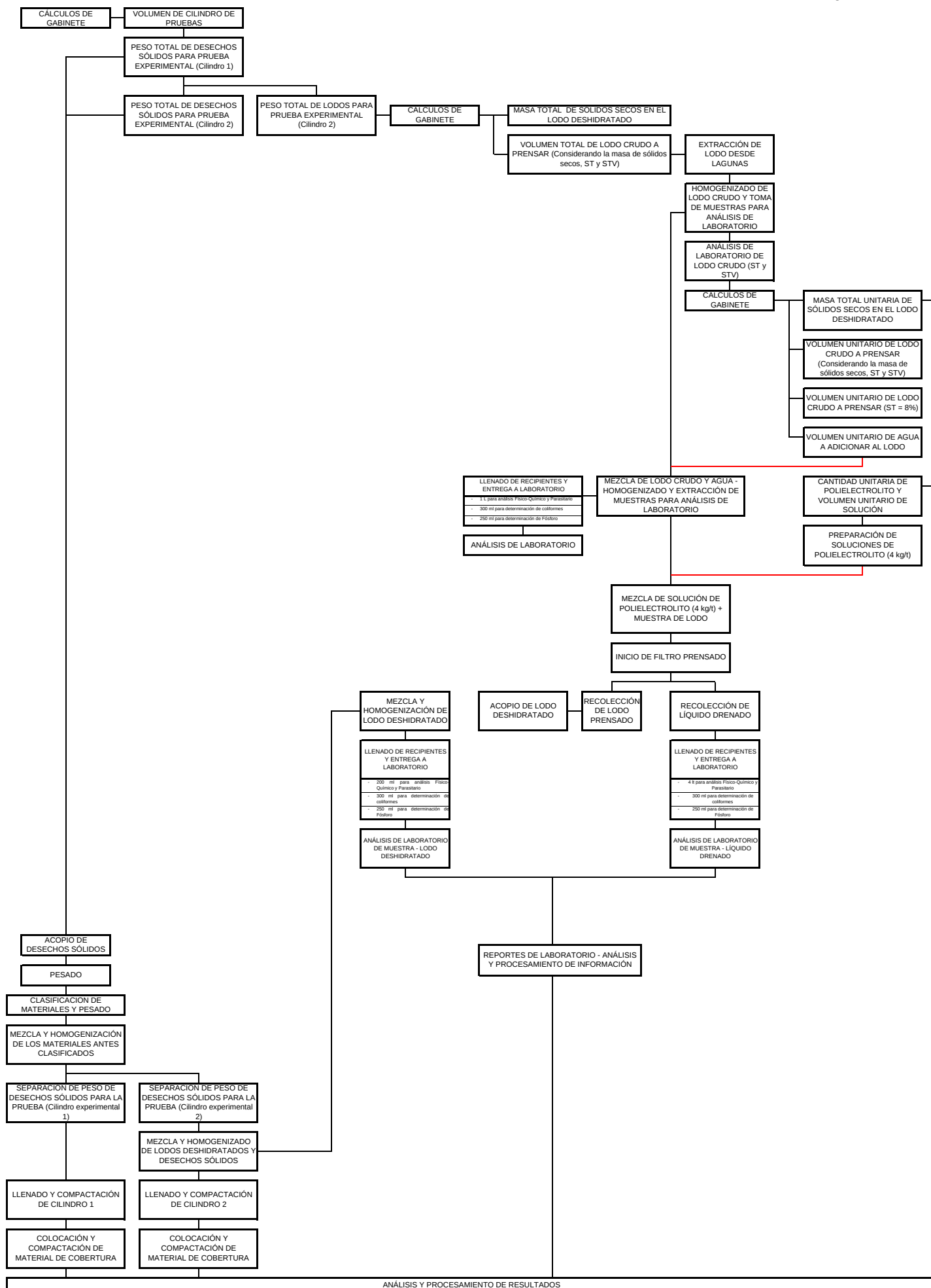


Figura 11: Diagrama para la ejecución de las pruebas experimentales para la determinación de ocupación del relleno sanitario

2.6.1 Normativa

A nivel nacional está vigente y es de cumplimiento obligatorio la Norma de Calidad Ambiental para el Manejo y Disposición Final de Desechos Sólidos No Peligrosos contenido en el Libro VI Anexo 6 del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria en vigencia desde el año 2004. A su vez se encuentra en fase de estudio y socialización el Acuerdo No. 26 Registro de Generadores de Desechos Peligrosos previo al Licenciamiento Ambiental, y para el Transporte de Materiales Peligrosos, cuya promulgación está prevista en el año 2009.

A nivel local está vigente, a partir de junio de 1993, la Ordenanza de Administración, Regulación y Tarifas para el Uso de los Servicios de Alcantarillado del Cantón Cuenca y su Reglamento.

Tanto a nivel nacional como local, no existe normativa relacionada con el uso y manejo de lodos de sistemas de tratamiento de aguas residuales, por lo que para la formulación del modelo, se ha tomado como guía las normas de la Agencia Ambiental de los Estados Unidos – EPA - “Part 503 – Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge”.

2.6.2 Características del lodo crudo (estratigrafía) y deshidratado

En el modelo se han utilizado los resultados de la caracterización estratigráfica y de las pruebas experimentales de deshidratación con la dosis óptima de polielectrolito, detallados en el capítulo 3.

Con base a dichos resultados, se ha cuantificado el nitrógeno disponible en el lodo (*Ec. 1*) (Tomoyuki et al., 2002), así como la tasa de aplicación del lodo al terreno en función de este nutriente (*Ec. 2*). Se debe tener en cuenta que tanto nitritos y nitratos serán iguales a cero debido a que los lodos han sido digeridos por vía anaeróbica.

$$N_d = \frac{FM}{100} * (N_{NKT} - N_{NH_3}) + (0,5 * N_{NH_3}) + (N_{NO_3} + N_{NO_2}) \quad (Ec. 1)$$

$$TA = \frac{N_p}{N_d} \quad (Ec. 2)$$

TA:	Tasa de aplicación (t/ha)	NNKT:	Nitrógeno Kjeldahl (mg/kg)
N _p :	Nitrógeno recomendado para la cultura (kg/t)	NNH ₃ :	Nitrógeno Amoniacal (mg/kg)
N _d :	Nitrógeno disponible en el biosólido (kg/t)	NNO ₃ + NNO ₂ :	Nitratos y Nitritos (mg/kg)
FM:	Fracción de mineralización del Nitrógeno (%)		

La tasa de aplicación del lodo al terreno ha sido evaluada, en función del Fósforo, Potasio, y del Nitrógeno, el cual es el elemento de mayor valor económico en el lodo, siendo también el elemento al cual las culturas presentan mayor respuesta (Andreoli et al., 2001) y por los efectos adversos al ambiente, en el suelo y los recursos hídricos superficiales y subterráneos, que su manejo inadecuado podrían causar.

2.6.3 Costos de transporte y disposición final del lodo deshidratado

Para la evaluación de esta variable se considera la siguiente información: a) costo unitario de transporte de 0,37 dólares/t km (ETAPA, 2008), b) distancia entre la PTAR y el relleno sanitario de Cuenca determinada sobre la ruta óptima para este trabajo de 22,65 km (ETAPA, 2008a), c) pesos y volúmenes de 57,48 t y 51 m³ respectivamente (ETAPA, 2004), y d) el costo unitario de disposición final en el relleno sanitario de 15 dólares/t.

2.6.4 Requerimientos de infraestructura

En función de los resultados obtenidos en las pruebas de post-deshidratación, esta operación constituye una de las alternativas viables para optimizar la gestión de la disposición final de los lodos, requiriendo la construcción de una infraestructura de almacenamiento del producto por un tiempo que permita disminuir los pesos y volúmenes a ser transportados en función de un análisis de costo mínimo. La infraestructura requerida estaría constituida por celdas construidas en hormigón armado con una capacidad máxima de un día de almacenamiento del producto deshidratado mecánicamente. Dicha infraestructura será un área cubierta en toda su extensión para evitar la incidencia de las lluvias en el proyecto.

2.6.5 Disponibilidad y aptitud de terrenos en el área de influencia económica del proyecto

En el presente artículo se considera como el área de influencia económica, a aquella dentro de la cual el lodo producto de la deshidratación, podría ser utilizado a igual costo para la Empresa que aquel necesario para el transporte y co-disposición con los desechos sólidos, para lo cual se prevé calcular una distancia máxima de transporte en virtud de que se eliminaría la tasa de disposición final en el relleno sanitario. En función de la distancia máxima y de las vías principales, se definirán los puntos máximos de intersección en cada una de ellas para su posterior unión y definición del área económica del proyecto, habiéndose considerado adicionalmente un área de influencia de 5 km a cada lado del eje de la vía. Complementariamente se han definido tres hitos a partir de los cuales no es posible aplicar el lodo al terreno, y que lo constituyen las captaciones de las plantas potabilizadoras de la ciudad de Cuenca.

Para la definición y determinación del uso actual del suelo y la cobertura vegetal en el área de influencia económica del proyecto, se emplea la información disponible en la cuenca del Río Paute en los años 1991 y 2001, de tal forma de evaluar el comportamiento y tendencia en el tiempo de los diferentes componentes, y así determinar la necesidad de extrapolar los resultados obtenidos al año de inicio del sistema de deshidratación y disposición final de lodos.

3 Resultados y discusión

3.1 Análisis de datos históricos

La variabilidad de ST en las lagunas aeradas es estadísticamente superior a la obtenida para las lagunas facultativas, en tanto que la mediana de la línea 1 es similar, y en la línea 2 la mediana encontrada en la Laguna Aerada 2 es estadísticamente superior a la obtenida en la Laguna Facultativa 2. El rango de ST se situó entre 9,7% y 18%. Los resultados obtenidos verifican que los lodos retirados de lagunas primarias en general presentan elevados contenidos de sólidos totales (ST) y bajos contenidos de sólidos volátiles ($SV < 50\% ST$) (Gonçalves et al., 2000). La franja de valores de ST obtenidos en la PTAR Cuenca se enmarca en los valores reportados para lagunas de estabilización, y son superiores a los observados en sistemas de tratamiento en donde se emplean otras tecnologías.

La gravedad específica calculada de los sólidos se situó entre 1,660 y 1,933 con un valor de 1,764 para la mediana. Los resultados obtenidos son superiores a los reportados para lagunas de estabilización en donde se situaron en la franja de 1,37 a 1,64 (von Sperling y Gonçalves, 2001).

El rango de STV encontrado es del 20%ST al 34%ST. La variabilidad de la fracción de STV y la mediana observada en las series de datos es similar para las lagunas aeradas y facultativas. Los resultados obtenidos, indican una reducción del 60% en el contenido de SV en relación al contenido registrado en el afluente, con lo que se verifica que la digestión anaerobia reduce del 35% a 60% los sólidos volátiles, (Tomoyuki et al., 2002), y que los lodos de lagunas presentan características específicas debido al largo tiempo de permanencia dentro de los reactores. Este período de retención elevado permite, al mismo tiempo, un importante espesamiento, digestión anaerobia extensiva y la descomposición de material orgánico de biodegradación muy lenta cuando la edad de los sólidos en la capa de lodo es superior a un año (Sacar e Pescod, 1999 en Gonçalves et al., 2000). La fracción de STV encontrada en los lodos de la PTAR Cuenca es inferior a la reportada para lodos de lagunas de estabilización y los procedentes de otros sistemas de tratamiento. Los valores obtenidos son importantes desde el punto de vista de la normativa existente para evitar la atracción de vectores, más aún si se considera que el lodo analizado es de una edad relativamente corta en virtud de que fue extraído desde la capa superior del lecho de lodo.

Encontramos que la mediana de la masa específica del lodo en las Lagunas Aeradas es estadísticamente superior a la de las Lagunas Facultativas, y que los de las dos Lagunas Aeradas y las dos Lagunas Facultativas son similares entre sí. El rango de variación para las Lagunas Aeradas se situó entre 1110 kg/m³ y 1050 kg/m³ con una mediana de 1077 kg/m³, en tanto que para las Lagunas Facultativas el máximo obtenido fue de 1070 kg/m³, el mínimo de 1040 kg/m³ y la mediana de 1051 kg/m³. El valor máximo obtenido en las Lagunas Aeradas indicarían la fracción de sólidos inertes coloidales que escapan al proceso de desarenado en el pretratamiento, en tanto que los obtenidos en las Lagunas Facultativas representan los sólidos biológicos del proceso de tratamiento, cuyos valores son iguales a los reportados para lagunas de estabilización.

El principal mecanismo de remoción de fósforo en lagunas de estabilización es la sedimentación (Kellner y Cleto, 1998), siendo el fósforo contenido en los biosólidos procedente de los desechos de los cuerpos microbianos del agua residual y de los detergentes y jabones que utilizan fosfatos como aditivos (Tomoyuki et al., 2002). En la PTAR Cuenca se ha registrado

una eficiencia de remoción de P del 49% (ETAPA, 2008), el mismo que es superior a valores reportados para lagunas facultativas y aeradas, en donde la eficiencia de remoción usualmente es inferior al 35% (von Sperling, 2002). El rango de valores obtenidos en los lodos de la PTAR Cuenca de 0,89 g/kg a 6 g/kg es significativamente inferior a los reportados por la EPA para lodos digeridos, sin embargo son similares a los reportados en la laguna de Eldorado-Brasil (Sistema Australiano), en donde el contenido Fósforo Total se situó en 0,8% (8 g/kg) y a los encontrados en la Laguna Facultativa primaria de Mata da Serra, en donde el contenido de Fósforo Total estuvo próximo al 1% (10 g/kg)(Tomoyuki et al., 2002).

Los valores obtenidos en la PTAR Cuenca de 1,0 g/kg a 7,6 g/kg se encuentran el rango reportado por la EPA para lodos sometidos a tratamiento, encontrándose los mismos en los límites inferiores. La mediana de la fracción de NH_4 en el NKT es del 17%. El N. Orgánico en los lodos crudos depositados en el complejo de lagunas de estabilización se encuentra en el rango de 0,38 g/kg a 24,7 g/kg y representa entre el 19% y 95% del NKT encontrado en los lodos, con una mediana y promedio del 83% y 80% respectivamente, con lo que se verifica que existe un claro predominio de la forma orgánica. Los valores de NKT obtenidos se sitúan en el límite inferior reportado para lodos sometidos a procesos de tratamiento (aerobio, anaerobio y otros procesos), sin embargo son similares a los encontrados en la laguna de Eldorado (Sistema Australiano) y en la Laguna Facultativa primaria de Mata da Serra, en donde el contenido de nitrógeno total se situó en la franja de 2% (20 g/kg)(Tomoyuki et al., 2002).

El rango de valores de K de 920 mg/kg a 1500 mg/kg obtenidos en los lodos depositados en la PTAR Cuenca se encuentran en el límite inferior reportado por la EPA para lodos tratados en sistemas aerobios, anaerobios y otros, y son superiores a los encontrados en la laguna anaerobia de Eldorado, en donde se reporta una concentración de 444 mg/kg en una muestra superficial obtenida con draga (Tomoyuki et al., 2002).

La variación de Coliformes Totales y Termotolerantes, se encontró en un rango de $2,96\text{E}+08$ NMP/g – $1,30\text{E}+03$ NMP/g y $3,15\text{E}+07$ NMP/g – $1,50\text{E}+02$ NMP/g, con una media geométrica de $2,01\text{E}+05$ NMP/g y $2,04\text{E}+04$ NMP/g para cada indicador respectivamente. La mediana de los valores obtenidos para Coliformes Totales y Coliformes Termotolerantes en las Lagunas Aeradas son estadísticamente superiores a los de las Lagunas Facultativas, y que los de las dos Lagunas Aeradas y las dos Lagunas Facultativas son similares entre sí (*Fig. 12; Fig.13*). El rango de Coliformes Termotolerantes obtenido en el lodo de las Lagunas Facultativas ($2,20\text{E}+06$ NMP/g – $1,50\text{E}+02$ NMP/g) es inferior en una unidad logarítmica al obtenido para las Lagunas Aeradas ($3,15\text{E}+07$ NMP/g – $5,80\text{E}+03$ NMP/g); igual tendencia se registra en la media geométrica en donde se obtuvieron valores de $6,83\text{E}+03$ NMP/g y $6,67\text{E}+04$ NMP/g para las Lagunas Facultativas y Aeradas respectivamente. El decaimiento bacteriano expresado en términos de Coliformes Totales registro una disminución de un ciclo logarítmico entre las Lagunas Facultativas y Aeradas tanto para el rango como para la media geométrica.

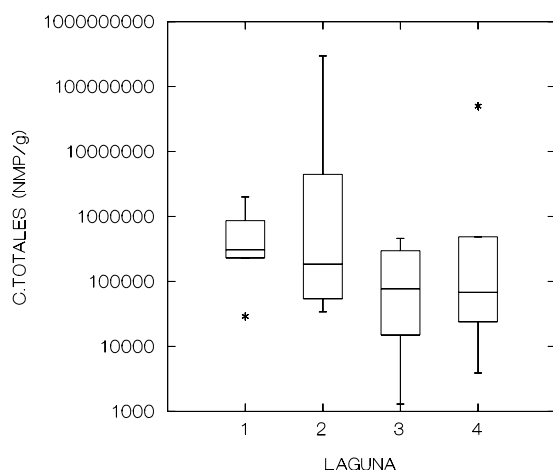


Figura 12: Variabilidad de Coliformes Totales en el lodo – Clasificación por unidad de tratamiento. 1) L. Aerada 1, 2) L. Aerada 2, 3) L. Facultativa 1, y 4) L. Facultativa 2

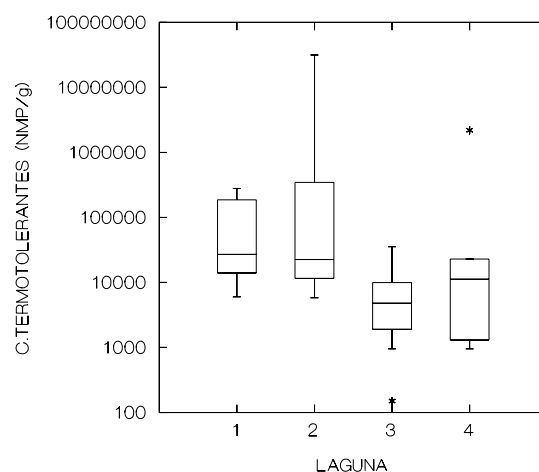


Figura 13: Variabilidad de Coliformes Termotolerantes en el lodo – Clasificación por unidad de tratamiento. 1) L. Aerada 1, 2) L. Aerada 2, 3) L. Facultativa 1, y 4) L. Facultativa 2

Las densidades máxima y mínima de Coliformes Termotolerantes encontrada en las Lagunas Facultativas de la PTAR Cuenca es superior en un ciclo logarítmico y menor en dos ciclos logarítmicos a las encontradas en investigaciones efectuadas en Sao Paulo por Tsutiya y Cassettari (1995), en donde se registraron valores entre $2,2 \times 10^4$ y $1,7 \times 10^5$ NMP/g (Yoshiharu, 2002). La media geométrica de Coliformes Termotolerantes obtenidos en la PTAR Cuenca es similar a los reportados para lagunas anaerobias. En investigaciones realizadas en Maringá y otras lagunas anaerobias en Espírito Santo-Brasil, la concentración media inicial de coliformes fecales fue de $4,9 \times 10^4$ NMP/g (MS) y $1,9 \times 10^3$ NMP/g (MS) (Gonçalves et al., 2000). La densidad máxima obtenida es superior en un ciclo logarítmico a los encontrados en Maringá en donde las concentraciones de Coliformes Fecales variaron entre 10^6 y 10^4 NMP/g en diferentes puntos de recolección de muestras (Gonçalves et al., 2000) y la densidad mínima de Coliformes Termotolerantes obtenida es similar a la presentada para Eldorado en donde varió de $8,3 \times 10^2$ y $5,4 \times 10^4$ NMP/g (Yoshiharu, 2002).

Un resumen de los resultados se presenta en la Tabla 4.

Parámetro	Unidad	Máximo	Promedio	Mediana	Mínimo
Características físicas					
Sólidos Totales	%	18	13,3	12,9	9,7
Sólidos Totales Volátiles	%ST	34	27	28	20
Masa Específica	kg/m ³	1110	1065	1065	1040
Características químicas inorgánicas					
Fósforo	g/kg	6,0	3,0	2,9	0,89
Nitrógeno Amoniacal	g/kg	7,6	2,8	2,6	1,0
Nitrógeno Orgánico	g/kg	25	13	14	0,38
Potasio	mg/kg	1500	1244	1250	920
pH	-	7,22	6,49	-	6,04
Aluminio	g/kg	24	15	14	0,55
Cadmio	mg/kg	3,2	2,1	2,1	0,70
Cobre	mg/kg	370	201	218	10
Cromo	mg/kg	515	299	308	15
Níquel	mg/kg	50	28	29	5,0
Plomo	mg/kg	270	138	140	6,0
Zinc	mg/kg	1800	993	1085	90
Características biológicas					
Coliformes Totales	NMP/g	2,96E+08	2,01E+05	-	1,30E+03
Coliformes Termotolerantes	NMP/g	3,15E+07	2,04E+04	-	1,50E+02
Helminthos	HH/g	179	90	-	10

Tabla 4: Características físicas, químicas y biológicas del estrato superior de lodos (Los valores corresponden a la capa superior del estrato de lodos)

3.2 Caracterización estratigráfica

Se registró una correlación positiva entre la concentración promedio de ST y la profundidad del estrato de lodos. Los resultados se ajustan a una recta con un $R^2 = 0,9981$ (Ec. 3).

$$ST (\%) = \frac{0,7112 - h}{0,1456} \quad (\text{Ec.3})$$

h altura medida desde la superficie de la laguna en metros con signo negativo.

La concentración promedio es superior en un 49% y 91% para los estratos intermedio e inferior respectivamente, en relación a la obtenida para el estrato superior. Los valores máximos obtenidos fueron de 8,86%, 14,55% y 16,57% para los estratos superior, intermedio e inferior respectivamente. Los resultados obtenidos son menores a 19,59%, 16,97% y 13,8% obtenidos en el estudio efectuado en el año 2005 (Alvarado, 2005). Valores superiores han sido reportados para lagunas anaerobias en Brasil, en donde en la laguna anaerobia de Eldorado (ES) se han alcanzando contenidos de sólidos superiores al 22% (Gonçalves et al., 2000; Yoshiharu, 2002). De los resultados obtenidos se desprende que el contenido de sólidos en la Laguna Facultativa 1 decae de forma lineal, lo cual se encuentra en contraposición a resultados obtenidos en la laguna anaerobia de Eldorado (Gonçalves et al., 2000; Yoshiharu, 2002).

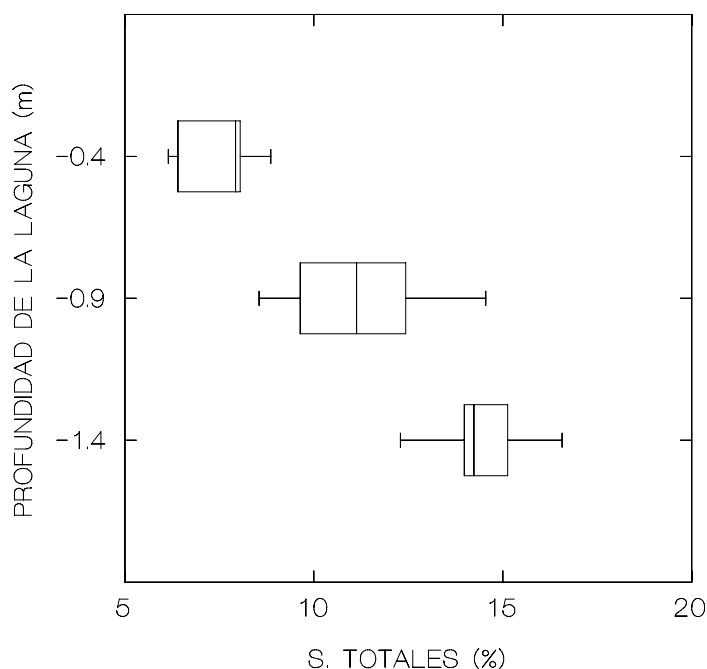


Figura 14: Variación de la concentración de sólidos totales en el estrato de lodos

La concentración de STV en el estrato de lodos presenta la misma tendencia que la obtenida para los ST, es decir se ajustan a una recta con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,99$. El rango de variación de materia orgánica expresada en términos de la relación STV/ST resulta muy estrecho, con lo que se verifica que el lodo en todos sus estratos tiene un avanzado estado de mineralización (Tabla 5). Los resultados obtenidos son similares a los registrados por

Alvarado (2005), en donde se obtuvieron valores de 32%, 27% y 24% para los estratos superior, intermedio e inferior respectivamente, en tanto que son inferiores a los reportados en la laguna anaerobia de Eldorado en Brasil en donde el contenido de sólidos volátiles se situó en la franja de 35% (Gonçalves et al., 2000; Yoshiharu, 2002).

Se registró una correlación positiva entre la concentración promedio de P y la profundidad del estrato de lodos (Ec. 4), y entre la concentración promedio de P y la concentración de ST (Ec. 5). Los resultados promedio se ajustan a una curva logarítmica con un $R^2 = 0,9949$ en el primer caso, y a una recta con un $R^2 = 0,9953$ en el segundo.

$$P (g / kg) = e^{\left(\frac{h + 5,085}{3,415} \right)} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$P (g / kg) = -0,1466 ST + 5,0518 \quad (\text{Ec. 5})$$

h altura medida desde la superficie de la laguna en metros con signo negativo.
ST en porcentaje.

La concentración promedio de P obtenida es menor en un 15% y 25% para los estratos intermedio e inferior respectivamente, en relación a la obtenida para el estrato superior. La tendencia observada no se ajusta a estudios anteriores efectuados en esta unidad de tratamiento (Alvarado, 2005), lo cual podría estar relacionado la concentración de sólidos (edad de lodo) en uno y otro estudio.

La concentración promedio de NH_4 obtenida es menor en un 24% y 15% para los estratos intermedio e inferior respectivamente, en relación a la obtenida para el estrato superior. No se observa una tendencia de la concentración de NH_4 con la profundidad del estrato de lodos. De acuerdo al pH registrado para cada uno de los estratos de lodo, el nitrógeno amoniacal presente, estaría en la forma de ión amonio (NH_4). El Nitrógeno Amoniacal representa entre un 20% y 24% del Nitrógeno Kjeldahl Total encontrado en los lodos, con lo que se verifica que las formas minerales (nitríca y amoniacal), representan una pequeña fracción del N total, y son las que están prontamente disponibles para las plantas (Andreoli et al., 2001), en tanto que en el afluente a la PTAR representa el 52% del NKT, proporcionando un ambiente favorable para que se desarrollen las poblaciones de algas (König, 2000).

El N. Orgánico mostró una correlación positiva entre la concentración promedio y la profundidad del estrato de lodos, y la concentración de ST. Los resultados promedio se ajustan a una curva logarítmica con un $R^2 = 0,9989$ en el primer caso (Ec. 6), y a una recta con un $R^2 = 0,9992$ en el segundo (Ec. 7).

$$N. \text{Orgánico} (g / kg) = e^{\left(\frac{h + 10,802}{3,7909} \right)} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$N. \text{Orgánico} (g / kg) = -0,5273 ST + 19,54 \quad (\text{Ec. 7})$$

h altura medida desde la superficie de la laguna en metros con signo negativo.
ST en porcentaje.

La concentración promedio de N. Orgánico obtenida es menor en un 13% y 23% para los estratos intermedio e inferior respectivamente, en relación a la obtenida para el estrato superior. El Nitrógeno Orgánico representa entre un 76% y 80% del NKT encontrado en los lodos, con lo que se verifica que la fracción orgánica constituye la mayor porción del N del lodo, variando de 70% a 90% dependiendo del tipo de biosólido y de su edad (Andreoli et al., 2001), en tanto que en el afluente representa el 48% del NKT. La predominancia del N. Orgánico, se encuentra reflejada en el Nitrógeno Kjeldahl Total tanto para la variabilidad en cada uno de los estratos, así como en la tendencia en el perfil de lodos (*Fig. 15; Fig. 16*). La tendencia observada es similar a estudios anteriores efectuados en esta unidad de tratamiento (Alvarado, 2005), es decir a medida que aumenta la edad del lodo la concentración es menor, con lo que se verifican los procesos de amonificación que se están dando en el estrato de lodos en donde las bacterias rápidamente descomponen el nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal (Romero, 1995). Desde el punto de vista agrícola y tomando en consideración la representatividad de esta forma de N en el lodo, deberá tenerse en cuenta que el nitrógeno orgánico debe de sufrir un proceso de mineralización, transformándose lentamente en formas minerales, para entonces ser absorbido por las plantas (Andreoli et al., 2001), por lo que se considera para lodos digeridos anaeróbicamente un factor de mineralización del 20% (EPA, 1983; Tomoyuki et al., 2002) en el primer año, 10% en el segundo, 5% en el tercer año y 3% desde el cuarto hasta el décimo año (EPA, 1983).

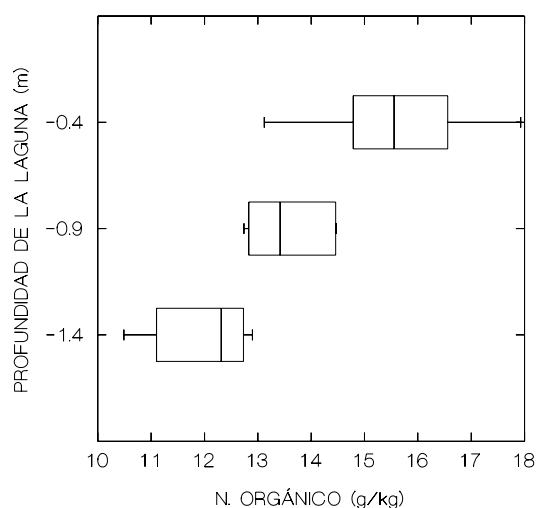


Figura 15: Variabilidad de la concentración de N. Orgánico en el estrato de lodos

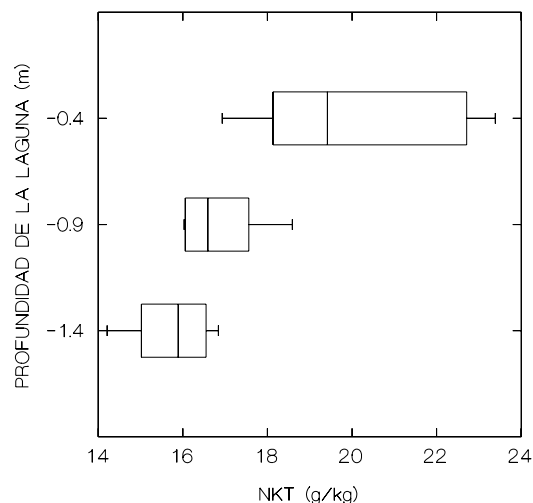


Figura 16: Variabilidad de la concentración de NKT en el estrato de lodos

La concentración promedio de K obtenida es menor en un 16% y 23% para los estratos intermedio e inferior respectivamente, en relación a la obtenida para el estrato superior (*Tabla 4*). La tendencia observada podría estar relacionada con la concentración de humedad debido a que las concentraciones de potasio en el lodo son pequeñas porque este elemento es altamente soluble en agua y durante el proceso de tratamiento del agua residual queda contenido en el efluente líquido (0,01% - 0,39%)(Tomoyuki et al., 2002). Los valores obtenidos son superiores a los registrados en estudios similares, tal es el caso de estudios efectuados en la laguna anaerobia de Eldorado, que mostraron concentraciones de 384 mg/kg, 374 mg/kg, 420 mg/kg y 394 mg/kg en muestras tomadas de 0 cm a 20 cm, 40 cm a 60 cm, 80 cm a 100 cm y 120 cm a 140 cm respectivamente, en tanto que en muestras compuestas se detectó un valor de 408 mg/kg, 499 mg/kg y 698 mg/kg en las lagunas anaerobias de Eldorado, facultativa primaria de Mata da Serra y aerada-decantación de Valparaíso respectivamente (Tomoyuki et al., 2002).

El valor promedio de pH obtenido es similar en todos los estratos y se encuentran en torno a la neutralidad (*Tabla 5*). Existe la tendencia al incremento de pH a medida que se profundiza en el estrato de lodos y los valores promedio son similares a los obtenidos en el estudio efectuado en la Laguna Facultativa 1 en el año 2005 (Alvarado, 2005). Debido al proceso de digestión anaerobia al que están sometidos los lodos depositados en las lagunas de la PTAR Cuenca, los valores de pH obtenidos en el presente estudio se encuentran en la franja óptima para el crecimiento de las bacterias productoras de metano, cuyo rango de pH está entre 6,6 y 7,4 (6,8 – 7,4 (König, 2000)), sin embargo se puede conseguir la estabilidad en la formación de metano en una faja mas amplia de pH, entre 6,0 y 8,0 (Chernicharo, 1997).

La concentración promedio obtenida de Al, Na y Ni es menor a medida que se profundiza en el estrato de lodos; para el Cr, Fe, Mn y Pb la tendencia es inversa, es decir la concentración promedio aumenta con la profundidad. Para el Cd y Cu no se observa una tendencia establecida, sin embargo la menor concentración se presenta en el estrato intermedio, en tanto que para el Zn la mayor concentración promedio se ha obtenido en este mismo estrato.

El promedio geométrico de la densidad de Coliformes Totales y Termotolerantes es menor a medida que se profundiza en el estrato de lodos (*Fig. 18*) habiéndose obtenido la reducción de un ciclo logarítmico. Se ha obtenido una diferencia de entre uno y dos ciclos logarítmicos entre la densidad de los Coliformes Totales y los Coliformes Termotolerantes.

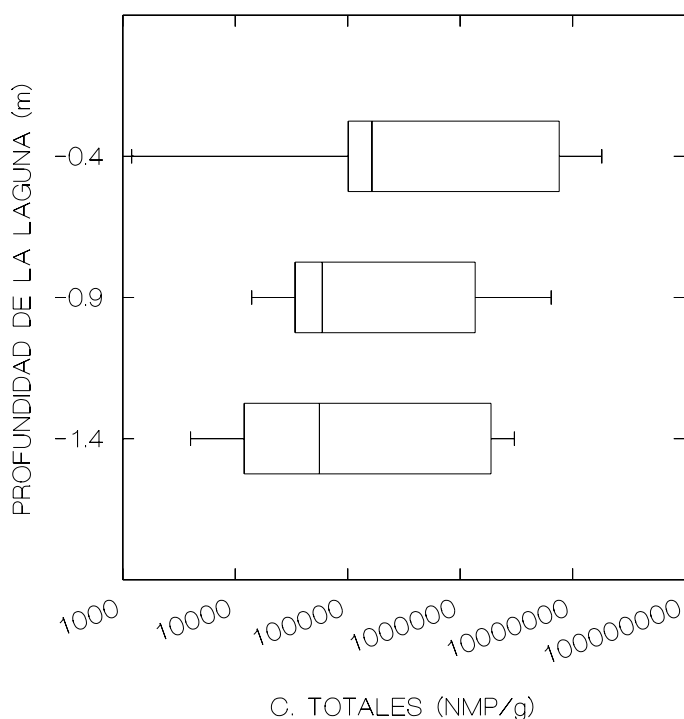


Figura 17: Variabilidad en la densidad de coliformes totales en el estrato de lodos

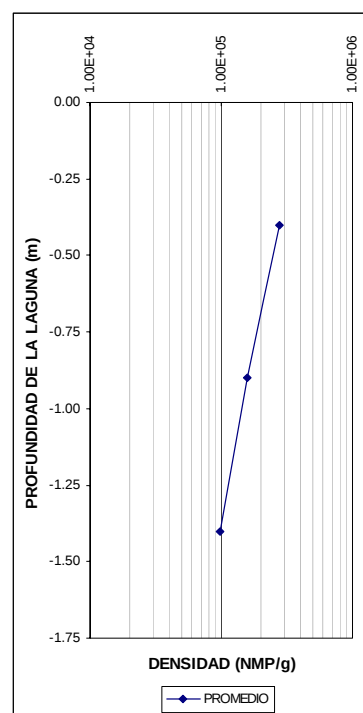


Figura 18: Valores promedio obtenidos en los diferentes estratos

El decaimiento bacteriano observado en el presente estudio en términos de Coliformes Termotolerantes, es significativamente menor a lo publicado por Nelson y Jiménez (1999), con respecto al lodo de una laguna facultativa primaria operando en la ciudad de México, en donde indican que buena parte de los coliformes fecales de las aguas residuales son capturados e inactivados en la capa de lodo. La densidad media de coliformes fecales varió en función de la

profundidad, con una media de 10^7 NMP/g (MS) en la región más próxima a la superficie, y $2,3 \times 10^3$ NMP/g (MS) en la región más profunda. Tal hecho demostró la ocurrencia de una inactivación de 4 log en el lodo de la laguna de estabilización facultativa estudiada (PROSAB, 2000). Por otro lado se señala que en lagunas facultativas profundas ($H > 1$ m) la capa inferior permanece en condiciones anaerobias, en la cual la tasa de remoción de DBO y de mortandad de patógenos es más reducida (von Sperling, 2002), por otro lado para lagunas anaerobias, en donde el principal mecanismo de eliminación de microorganismos es la sedimentación, los virus, bacterias y protozoarios se sedimentan, adheridos y absorbidos por sólidos decantables, o son arrastrados por éstos durante su sedimentación, sin embargo, su eliminación es poco eficiente y depende del tiempo de permanencia. En general el decaimiento bacteriano es de una unidad logarítmica, $\log_{10}$ (10 veces), nulo o igual a 10 veces, para virus y protozoarios, (Ovruski, 2000). Lo antes expresado se encuentra en concordancia con la disminución encontrada en la Laguna Facultativa 1 de la PTAR Cuenca.

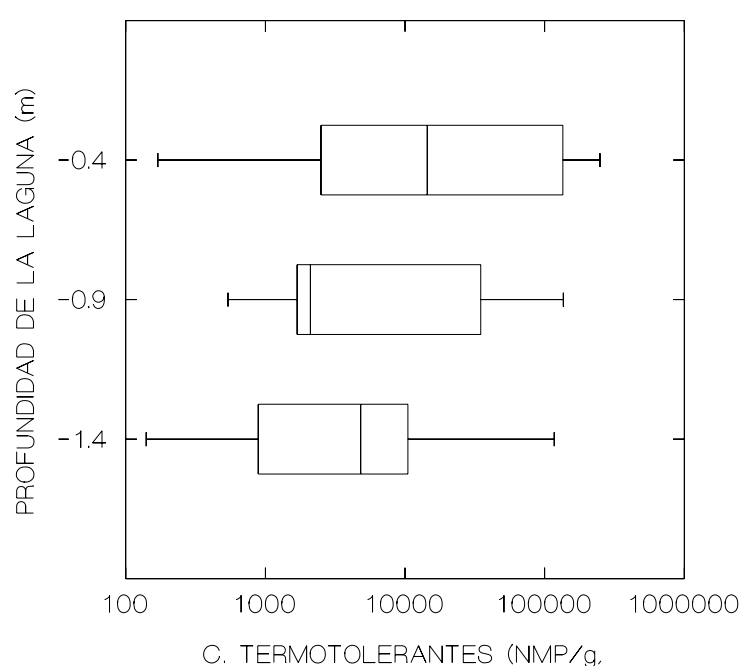


Figura 19: Variabilidad de la densidad de coliformes termotolerantes en el estrato de lodos

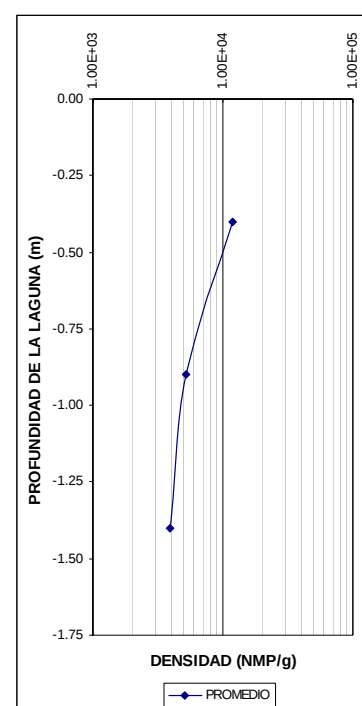


Figura 20: Valores promedio obtenidos en los diferentes estratos

La mayor densidad de Helmintos se ha presentado en el estrato intermedio (EI), en tanto que para los estratos inferior (EIN) y superior (ES) son similares (Tabla 5). En todos los estratos la clase predominante la constituyen los huevos de *Áscaris* sp. que representan un porcentaje del 85% de la totalidad de organismos identificados, lo cual está en concordancia con la densidad de Helmintos registrada en el afluente de la PTAR Cuenca, en donde los huevos de *Áscaris* sp. representan un 68% (ETAPA, 2008). Los valores reportados corresponden a organismos identificados en los diferentes estratos de lodo, y no representan el número total de organismos viables.

Un resumen de los resultados obtenidos se presenta en la Tabla 5.

Parámetro	Unidad	Estrato	Máximo	Promedio	Mediana	Mínimo
Características Físicas						
Masa Específica	kg/m³	ES	1029	1020	1023	1010
		EI	1034	1025	1027	1010
		EIN	1070	1056	1055	1042
Sólidos Totales	%	ES	8,9	7,6	7,9	6,2
		EI	14,6	11,2	11,1	8,6
		EIN	16,6	14,4	14,2	12,3
Sólidos Totales Volátiles	%ST	ES	29	28	28	27
		EI	29	26	27	22
		EIN	42	29	26	26
Características químicas inorgánicas						
Fósforo Total	g/kg	ES	5,6	4,0	4,0	2,5
		EI	5,0	3,4	3,2	2,2
		EIN	3,9	3,0	3,1	1,9
Nitrógeno Amoniacal	g/kg	ES	7,3	4,4	3,9	3,2
		EI	4,1	3,3	3,5	2,2
		EIN	4,1	3,8	3,8	3,3
Nitrógeno Orgánico	g/kg	ES	18	16	16	13
		EI	14	14	13	13
		EIN	13	12	12	10
Potasio	mg/kg	ES	2130	1808	1733	1590
		EI	1790	1511	1465	1320
		EIN	1540	1400	1395	1270
Sodio	mg/kg	ES	1790	1546	1610	1093
		EI	1750	1171	1055	924
		EIN	1330	1055	1045	797
pH	-	ES	7,09	6,79	6,75	6,65
		EI	7,11	6,80	6,79	6,58
		EIN	7,13	6,88	6,84	6,74
Aluminio	g/kg	ES	25	19	18	15
		EI	21	18	18	16
		EIN	27	18	18	10
Cadmio	mg/kg	ES	5,0	4,7	4,7	4,3
		EI	4,4	3,4	3,2	2,8
		EIN	5,1	3,9	3,9	3,2
Cobre	mg/kg	ES	320	223	216	150
		EI	240	217	225	183
		EIN	250	223	233	181
Cromo	mg/kg	ES	410	300	285	250
		EI	350	324	330	271
		EIN	400	338	345	260
Hierro	mg/kg	ES	19800	16355	15800	14900
		EI	21400	17039	17200	12500
		EIN	23500	18143	17750	12500
Manganeso	mg/kg	ES	340	271	314	60
		EI	350	288	318	130
		EIN	370	290	325	170
Níquel	mg/kg	ES	93	58	57	37
		EI	65	39	36	28
		EIN	47	34	36	17
Plomo	mg/kg	ES	224	168	158	125
		EI	210	184	194	132
		EIN	216	202	203	183
Zinc	mg/kg	ES	1460	1091	1030	920
		EI	1190	1160	1170	1120
		EIN	1190	1154	1155	1113

ES: Estrato superior
EI: Estrato intermedio
EIN: Estrato inferior

Tabla 5: Características físicas, químicas y biológicas del estrato de lodos de la Laguna Facultativa 1

Parámetro	Unidad	Estrato	Máximo	Promedio	Mediana	Mínimo
Características biológicas						
Coliformes Totales	NMP/g	ES	1,82E+07	2,77E+05	1,72E+05	1,20E+03
		EI	6,45E+06	1,57E+05	6,09E+04	1,40E+04
		EIN	3,03E+06	9,75E+04	1,28E+05	4,00E+03
Coliformes Termotolerantes	NMP/g	ES	2,49E+05	1,20E+04	3,08E+04	1,70E+02
		EI	1,36E+05	5,17E+03	2,15E+03	5,40E+02
		EIN	1,17E+05	3,91E+03	6,20E+03	1,40E+02
Helmintos	Nº/g	ES	42	41	41	40
		EI	74	69	69	64
		EIN	49	40	40	32

ES: Estrato superior
EI: Estrato intermedio
EIN: Estrato inferior

Tabla 5 (continuación): Características físicas, químicas y biológicas del estrato de lodos de la Laguna Facultativa 1

3.3 Determinación experimental de la dosis optima de polielectrolito para deshidratación

El promedio de la concentración de ST con la dosis óptima de 4 kg/t es superior en un 5% a la proyectada en los Diseños Definitivos del sistema de Extracción y Deshidratación en donde se contempla un 25% ST (ETAPA, 2004). La concentración en el lodo deshidratado se incremento entre un 16% y 21% en relación a la muestra de lodo crudo acondicionado. El rango de valores obtenidos experimentalmente (26% a 33%) para la dosis de 4 kg/t es similar al reportado para la ETE Barueri (Brasil) en donde la torta presenta contenidos de sólidos variando entre 27% y 33%, dosis de polímero en torno de 5 kg/t y tiempo de ciclo en torno de 2 horas, para lodo digerido anaeróbicamente (primario + secundario)(Kenji et al., 2002).

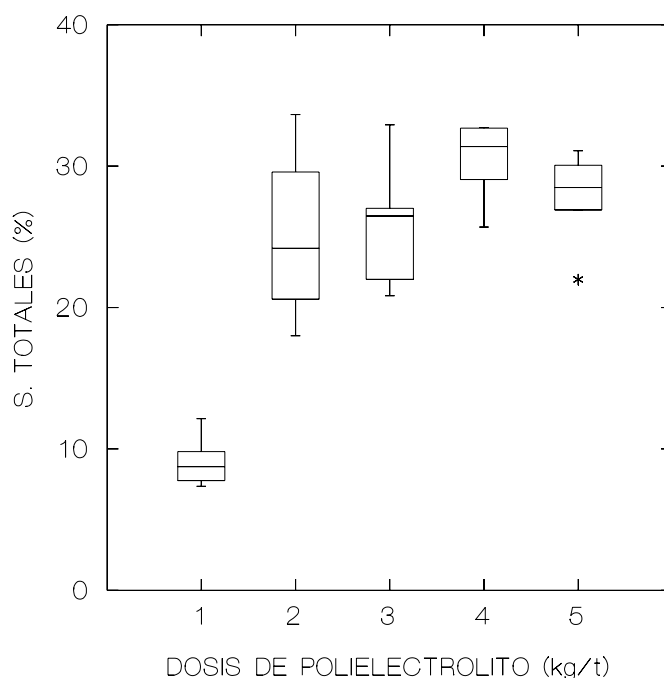


Figura 21: Variabilidad de la concentración de ST en función de la dosis de polielectrolito aplicada. 1) Lodo crudo, 2) lodo deshidratado con dosis de polielectrolito de 2 kg/t, 3) lodo deshidratado con dosis de 3 kg/t, 4) lodo deshidratado con dosis de 4 kg/t, y 5) lodo deshidratado con dosis de 5 kg/t.

La fracción de STV contenida en el lodo deshidratado de la Laguna Facultativa de la PTAR Cuenca, es menor en un 55% a la reportada para lodos procedentes de otros tipos de sistemas de tratamiento de aguas residuales, en donde en lodos no digeridos, la relación entre SV/ST está entre 0,75 y 0,80, y en los lodos digeridos estos valores se sitúan entre 0,60 y 0,65 (von Sperling y Gonçalves, 2001). En la norma Norteamérica CFR 40 Part 503 Subpart D se establecen los requerimientos para evitar la atracción de vectores (VAR – Vector Attraction Reduction) en la aplicación de lodo en el terreno o colocado en un sitio como disposición superficial. En lo relacionado a la fracción de STV se establece un porcentaje de remoción del 38% para digestión anaerobia y no a una fracción mínima a ser cumplida, siendo este requerimiento no comprobable en lodos de sistemas de lagunas, a no ser que se relacionase la eficiencia de remoción con los STV contenidos en el afluente de la PTAR. En el caso de la PTAR Cuenca la fracción de STV (28%) es menor a valores reportados para otras instalaciones que se encuentran dando cumplimiento al requerimiento de atracción de vectores, en donde se han presentado porcentajes de remoción del 44% al 55% con una fracción de STV en el efluente del tratamiento que oscila entre 67%ST y 70%ST (Everaldo et al, 2002).

En cada una de las pruebas experimentales ejecutadas, se identificó la presencia de desechos sólidos caracterizados principalmente por envolturas plásticas y fibras, habiéndose observado en menor grado partes metálicas pequeñas y trozos de madera. El rango de variación osciló entre 23 l/t (litros de desechos sólidos por tonelada de ST) y 45 l/t, con un promedio y mediana de 35 l/t y 36 l/t respectivamente. Las partes metálicas encontradas podrían escapar a las diferentes unidades previstas en el sistema proyectado por ETAPA, por lo que deberá prestarse especial atención al funcionamiento de los tamices contemplados, para así evitar daños en los rotores de las bombas y especialmente a las telas de los filtros banda a ser empleados en la deshidratación.

El rango de la masa específica calculada de 1126 kg/m³ a 1170 kg/m³ es superior a la reportada para lodos deshidratados, en donde se han obtenido valores que se encuentran en el rango de 1050 kg/m³ a 1100 kg/m³ (von Sperling y Gonçalves, 2001)

Las concentraciones y el rango de P en el lodo deshidratado es menor a la concentración originalmente presente en el lodo crudo, observándose que el lodo perdió entre el 51% y 63% del P originalmente presente en función a la dosis aplicada para la deshidratación (61% para la dosis óptima), y es significativamente menor a la reportada para lodos deshidratados procedentes de sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos de lodos activados en diferentes modalidades, en donde se ha detectado concentraciones de 0,93% (9,3 g/kg), 2,60% (26,0 g/kg), 0,60% (6,0 g/kg), 3,0% (33 g/kg) y 3,70% (37,0 g/kg) en las ETEs Franca, Bertioga, Humaitá, Brasilia y Belém respectivamente (Tomoyuki et al., 2002). Desde el punto de vista de valoración agronómica del P contenido en el lodo la disponibilidad para las plantas es del 50% en el primer año de aplicación del biosólido (Andreoli et al, 1997 en Tomoyuki, 2002; EPA, 1995 en Baptista, 2002), y se encuentra en el rango del 40% al 80% del total contenido en el material (Andreoli et al., 2001).

Las concentraciones y el rango de NH₄ en el lodo deshidratado es menor a la concentración originalmente presente en el lodo crudo, observándose que el lodo perdió entre el 37% y 40% del NH₄ originalmente presente en función a la dosis aplicada para la deshidratación (40% para la dosis óptima), y representa el 19% del Nitrógeno Kjeldahl Total contenido en el lodo crudo, en tanto que en el lodo deshidratado representa entre el 11% y el 12%. La disponibilidad del NH₄ para las plantas en lodo deshidratado y aplicado de cualquier manera (superficial o subsuperficial) es del 100% y se considera un factor de volatilización de 1 (EPA, 1983). Otros valores y criterios para el factor de volatilización se presentan en la bibliografía, los mismos que se encuentran relacionados con el tipo de aplicación de lodo al terreno. El N. Orgánico en el

lodo crudo representa el 81% del NKT, en tanto que en el lodo deshidratado representa entre el 88% y el 89%, por lo que la posible programación de su uso deberá considerar que la velocidad de mineralización es muy variable y se encuentra en función de la temperatura, humedad y actividad microbiana del suelo, entre otros factores, y puede variar ampliamente de un sitio a otro y de año a año (Andreoli et al, 2001). La concentración de NKT obtenida en el lodo deshidratado de la PTAR Ucubamba es significativamente menor a las reportadas para lodos deshidratados procedentes de sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos de lodos activados en diferentes modalidades, en donde se ha detectado concentraciones de 5,53% (55,3 g/kg), 3,93% (39,3 g/kg), 4,10% (41,0 g/kg), 5,5% (55 g/kg) y 4,91% (49,1 g/kg) en las ETEs Franca, Bertioga, Humaitá, Brasilia y Belém respectivamente (Tomoyuki et al., 2002), y los valores obtenidos en el lodo deshidratado con cada una de las dosis aplicadas son similares, por lo que se podría programar con un buen grado de certeza el posible uso benéfico del lodo.

La concentración de K en el lodo deshidratado es inferior a la concentración originalmente presente en el lodo crudo, habiéndose observado una pérdida en el rango del 28% al 36%, correspondiendo la mayor pérdida a la muestra de lodo deshidratado con la dosis de polielectrolito de 4 kg/t. Los resultados indican que las concentraciones de potasio son pequeñas porque este elemento es altamente soluble en agua y durante el proceso de tratamiento del agua residual queda contenido en el efluente líquido (0,01% - 0,39%)(Tomoyuki et al., 2002). Los valores obtenidos son similares a los reportados para lodos deshidratados procedentes de sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos de lodos activados en diferentes modalidades, en donde se ha detectado concentraciones de 0,26% (2600 mg/kg), 0,35% (3500 mg/kg), 0,15% (1500 mg/kg), 0,35% (3500 mg/kg) y 0,36% (3600 mg/kg) en las ETEs Franca, Bertioga, Humaitá, Brasilia y Belém respectivamente (Tomoyuki et al., 2002).

El valor de pH obtenido en el lodo deshidratado es superior al obtenido en el lodo crudo; igual situación acontece con el promedio de las muestras de lodo deshidratado, pudiendo observarse que el pH disminuye a mayores dosis de polielectrolito.

La concentración de Al, Cu, Fe y Mn obtenida en las diferentes pruebas experimentales (lodo crudo y lodo deshidratado) son similares y no se registran variaciones significativas, y en el Pb y Zn se ha observado un ligero incremento en el lodo deshidratado. Para el Cd, Cr, Ni y Na el lodo perdió entre el 37% y 39%, 14% y 17%, 35% y 39% y 39% a 53% de la concentración originalmente presente en el lodo crudo.

Un resumen de los resultados obtenidos con la dosis óptima de 4 kg/t se presenta en la Tabla 6.

Parámetro	Unidad	Muestra	Máximo	Promedio	Mediana	Mínimo
Características físicas						
Sólidos Totales	%	LC	12	9,1	8,8	7,4
	%	LD	33	30	31	26
Sólidos Totales Volátiles	%ST	LC	34	29	28	26
	%ST	LD	29	28	28	26
Características químicas inorgánicas						
Fósforo	g/kg	LC	5,2	3,4	3,3	2,2
	g/kg	LD	2,4	1,3	1,2	0,29
Nitrógeno Amoniacal	g/kg	LC	4,1	3,1	3,2	2,3
	g/kg	LD	2,3	1,9	1,9	1,4
Nitrógeno Orgánico	g/kg	LC	24	14	13	11
	g/kg	LD	16	14	14	13
Potasio	mg/kg	LC	2160	1761	1723	1420
	mg/kg	LD	1210	1127	1130	1010
Sodio	mg/kg	LC	1600	1285	1140	1080
	mg/kg	LD	810	599	526	500
pH	-	LC	7,19	6,70	-	6,39
	-	LD	8,21	7,46	-	7,02
Aluminio	g/kg	LC	21	15	16	5,8
	g/kg	LD	20	14	15	7,0
Cadmio	mg/kg	LC	7,0	4,2	4,6	2,1
	mg/kg	LD	2,8	2,7	2,6	2,5
Cobre	mg/kg	LC	340	238	220	183
	mg/kg	LD	270	234	227	220
Cromo	mg/kg	LC	550	364	344	280
	mg/kg	LD	390	305	300	230
Hierro	mg/kg	LC	19600	16843	15415	14900
	mg/kg	LD	19600	16384	17200	11400
Manganeso	mg/kg	LC	530	329	300	243
	mg/kg	LD	330	274	270	220
Níquel	mg/kg	LC	72	45	47	24
	mg/kg	LD	35	27	25	23
Plomo	mg/kg	LC	180	129	121	87
	mg/kg	LD	290	155	140	73
Zinc	mg/kg	LC	1490	969	930	580
	mg/kg	LD	1250	1008	990	810
Características biológicas						
C. Totales	NMP/g	LC	7.69E+05	3.04E+04	-	6.70E+03
	NMP/g	LD	2.44E+06	2.17E+05	-	4.50E+04
C. Termotolerantes	NMP/g	LC	9.06E+03	1.13E+03	-	3.00E+02
	NMP/g	LD	4.99E+04	6.50E+03	-	1.10E+03
Helmintos	Nº/g	LC	54,22	31,12	28,04	14,16
	Nº/g	LD	16,74	13,78	13,78	10,81

LC: Lodo crudo

LD: Lodo deshidratado

Tabla 6: Características físicas, químicas y biológicas en el lodo crudo y deshidratado



Figura 22: Consistencia del lodo deshidratado



Figura 23: Detalle de lodo deshidratado

Para el agua de escurrido del proceso de deshidratación, encontramos que:

La forma predominante de sólidos en el agua de escurrido correspondió a los SST, con una representación 86%, 86%, 55% y 71% sobre los ST para las dosis de 2 kg/t, 3 kg/t, 4 kg/t y 5 kg/t respectivamente, y que la fracción de SSV es similar a la obtenida en el lodo, con un rango que oscila entre el 29% y 39% SST.

El Nitrógeno Amoniacal es la forma predominante de Nitrógeno en el agua de escurrido, representando entre un 69% y 86% del NKT, con lo que se verifica que la mayor parte del nitrógeno inorgánico en lodo digerido es asociado con el sobrenadante y es removido durante la deshidratación (Webber, 1984 en Tomoyuki et al., 2002)

Un resumen de los resultados obtenidos en el agua de escurrido con la dosis óptima de 4 kg/t se presenta en la Tabla 7.

Parámetro	Unidad	Máximo	Promedio	Mediana	Mínimo
Sólidos Totales	mg/l	1650	944	978	379
Sólidos Suspendedos Totales	mg/l	1246	522	506	10
Sólidos Suspendedos Volátiles	mg/l	422	206	186	10
Fósforo	mg/l	29	22	22	15
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	156	126	131	90
Nitrógeno Orgánico	mg/l	32	20	17	12
Potasio	µg/l	18580	15292	14755	13000
Sodio	µg/l	32460	30858	30700	29750
pH	-	7,50	7,26	-	7,08
Aluminio	µg/l	13230	6760	6640	423
Cadmio	µg/l	6,9	3,7	3,6	1,4
Cobre	µg/l	224	95	85	3,3
Cromo	µg/l	342	141	128	3,0
Hierro	µg/l	12770	7672	8148	646
Manganeso	µg/l	665	423	412	165
Níquel	µg/l	46	31	33	13
Plomo	µg/l	138	97	101	30
Zinc	µg/l	952	525	531	40
Coliformes Totales	NMP/100 ml	3,50E+04	1,68E+04	-	1,40E+03
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	1,30E+04	4,00E+03	-	4,90E+02

Tabla 7: Características físicas, químicas y biológicas en el agua de escurrido

Existió una correlación lineal positiva entre varios parámetros analizados, cuyas variables se presentan en la Tabla 8, y la relación se encuentra expresada en la forma:

$$V_d = a(V_i) + b$$

V_d Variable dependiente
 V_i Variable independiente
 a y b Coeficientes

V_d	a	b	R^2
V_i : ST			
SST	0,8733	-	0,9901
SSV	0,2533	-	0,9892
SSF	0,6200	-	0,9862
Ni	0,0176	18,934	0,9299
Pb	0,1155	9,4295	0,9264
V_i : SST			
SSV	0,2893	-	0,9919
SSF	0,7107	-	0,9988
Cu	0,1947	27,604	0,9450
Ni	0,0191	24,876	0,9093
Pb	0,1249	49,144	0,9012
Zn	0,9045	117,4	0,9066
V_i : SSV			
Ni	0,0679	20,982	0,9141
Pb	0,4426	24,601	0,9008
V_i : SSF			
SSV	0,3901	81,954	0,9891
Cu	0,2703	44,164	0,9414
Ni	0,0265	26,533	0,9046
Zn	1,2567	192,57	0,9049
V_i : Al			
Cr	0,0175	80,308	0,9560
Fe	0,8207	6421,6	0,9053
Pb	0,0073	92,886	0,9121

V_d	a	b	R^2
V_i : Cr			
Cu	0,6172	65,88	0,9021
Fe	46,719	2778,7	0,9396
Ni	0,0634	26,646	0,9538
Pb	0,4155	60,304	0,9481
Zn	2,9864	214,11	0,9390
V_i : Fe			
ST	0,0704	453,53	0,9110
Cu	0,0132	31,267	0,9512
Ni	0,0013	23,928	0,9698
Pb	0,0088	38,874	0,9875
Zn	0,0637	42,689	0,9937
V_i : Pb			
Ni	0,1513	17,923	0,9324
V_i : Zn			
ST	1,1143	385,38	0,9324
SSV	0,2822	85,269	0,9038
Cu	0,2073	20,198	0,9666
Ni	0,0209	22,901	0,9817
Pb	0,1379	33,170	0,9926
V_i : Cu			
ST	5,3285	299,4	0,9479
SSV	1,3695	53,81	0,9463
Ni	0,0984	22,004	0,9689
Pb	0,6439	30,156	0,9616

ST, SST, SSV, SSV: mg/l

Al, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn: $\mu\text{g/l}$

Tabla 8: Relaciones en el agua de escurrido



Figura 24: Agua de escurrido del proceso de deshidratación



Figura 25: Toma de muestras para determinación de parámetros físicos

En la prueba de post-deshidratación se identificó que en la muestra inalterada el peso se estabilizó luego de transcurridos 98 días de su inicio y el lodo finalizó con el 30% de su peso y 24% de su volumen inicial. La concentración inicial de ST y STV fue de 26% y 27 %ST respectivamente, en tanto la final fue de 92% y 27%ST. La pérdida porcentual de peso se ajusta a una curva (Fig. 26) con un $R^2 = 0,9973$.

$$\Delta P = \frac{a + ct + et^2}{1 + bt + dt^2 + ft^3}; \{0 \leq t \leq 98\} \quad (\text{Ec. 8})$$

ΔP :	Peso remanente del lodo (%)	c :	-0,02776
t :	Tiempo de almacenamiento del lodo	d :	-0,00025
a :	1,002806	e :	0,000217
b :	-0,01106	f :	3,9803E-06

Para la muestra alterada (agitada) el peso se estabilizó luego de transcurridos 80 días del inicio de la prueba y el lodo finalizó con el 29% de su peso y 32% de su volumen inicial. La concentración inicial y final de ST y STV resultaron iguales a los obtenidos en la muestra inalterada. La pérdida porcentual de peso se ajusta a una curva (Fig. 26) con un $R^2 = 0,9999$.

$$\Delta P = \frac{a + ct + et^2}{1 + bt + dt^2 + ft^3}; \{0 \leq t \leq 80\} \quad (\text{Ec. 9})$$

ΔP :	Peso remanente del lodo (%)	c :	-0,02303
t :	Tiempo de almacenamiento del lodo	d :	-7,8627E-05
a :	1,0026	e :	0,000182
b :	-0,0047	f :	1,9449E-06

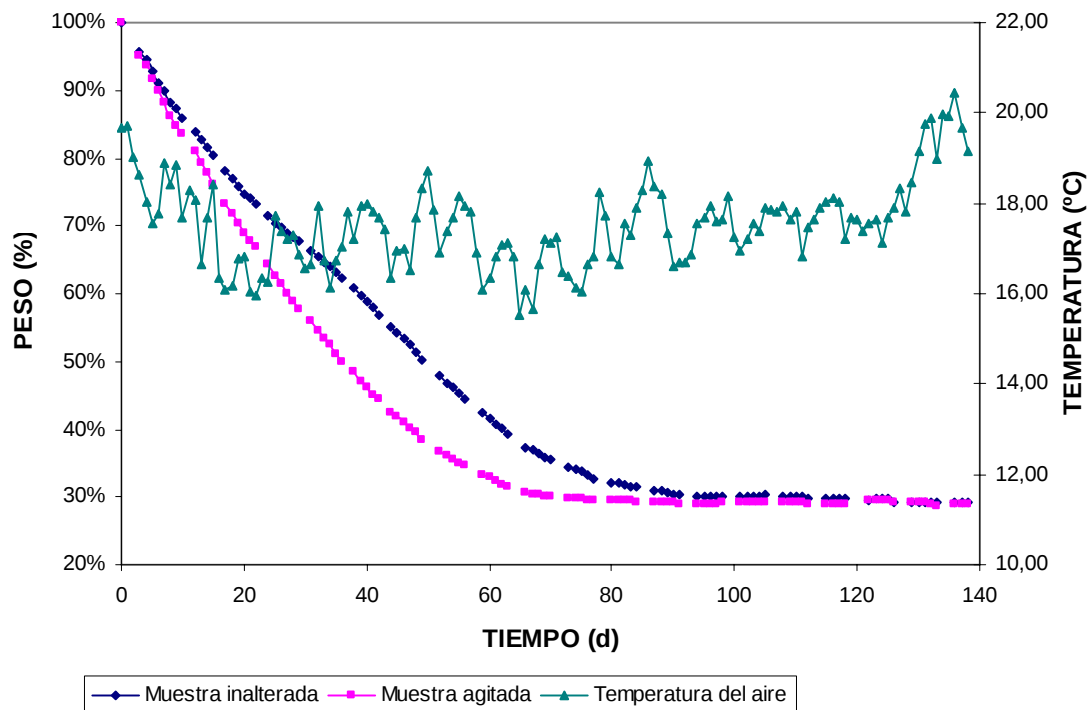


Figura 26: Pérdida de peso en el proceso de post-deshidratación

Desde el inicio de la prueba y hasta el día 40 la variación de la pérdida de peso entre los dos tipos de muestra se incremento (agitada menos inalterada), luego de lo cual la tendencia se invirtió, y al final los pesos resultaron similares (Fig. 27).

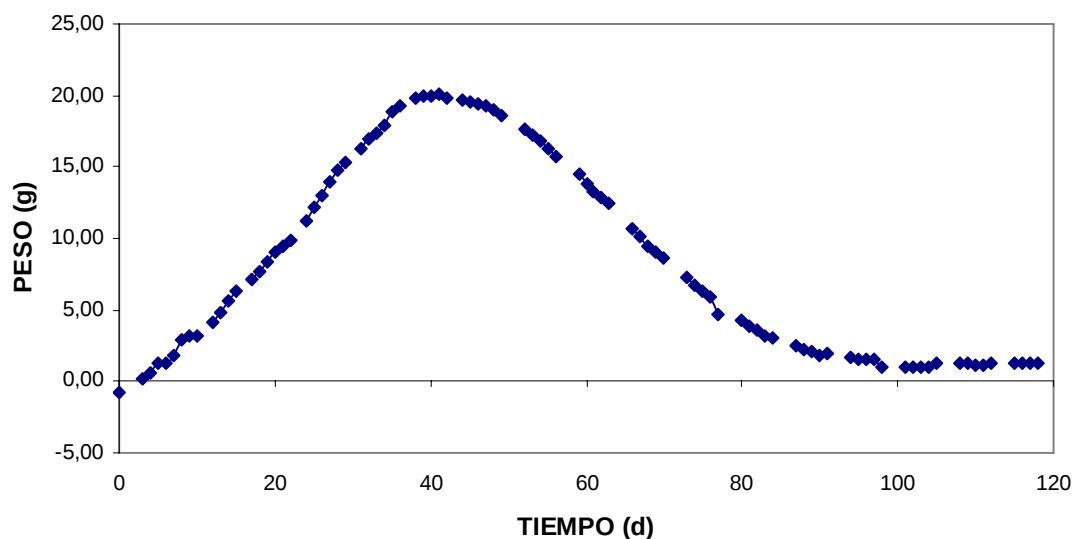


Figura 27: Variación de peso entre la muestra inalterada y agitada

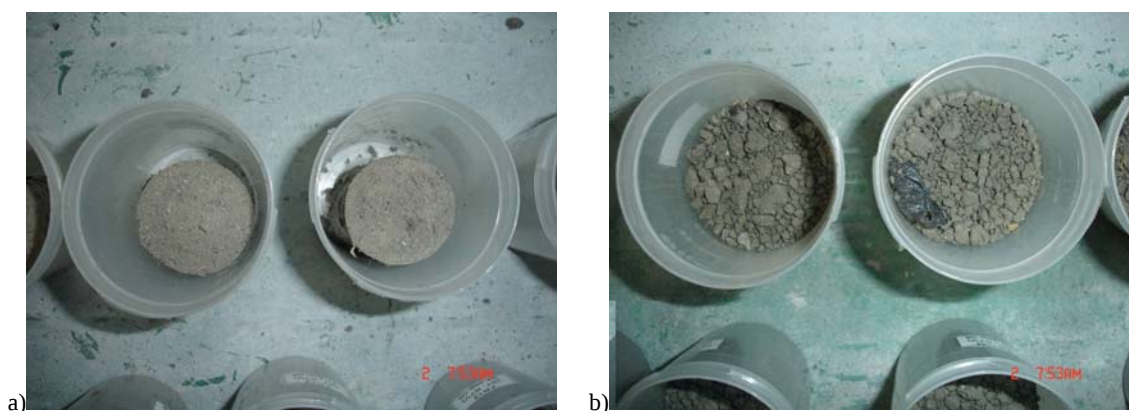


Figura 28: Muestras de lodo deshidratado en desecamiento natural una vez transcurridos 82 días. a) muestras inalteradas, y b) muestras agitadas

3.4 Determinación experimental de ocupación del relleno sanitario

En el reactor 1 llenado exclusivamente con desechos sólidos, se obtuvo un peso final de 614 kg y una densidad calculada de 623 kg/m³, lo cual representa un 83% de lo proyectado.

En el reactor 2 se alcanzó un peso final de 567 kg de desechos sólidos y 132 kg de lodo deshidratado, con lo cual la densidad final calculada es de 709 kg/m³. La relación final obtenida de desechos sólidos y lodo deshidratado es de 4,3:1, habiéndose verificado una disminución de desechos sólidos del 8% en peso en relación al conseguido en el reactor 1.

El sistema manual de compactación empleado para el llenado de los dos reactores experimentales, no permitió alcanzar la densidad de 750 kg/m³ del relleno sanitario de la ciudad, sin embargo el valor obtenido en la mezcla desechos sólidos-lodo deshidratado es superior al

conseguido para los desechos sólidos, debiéndose observarse que los mayores resultados obtenidos en el cilindro 2, obedece a que el lodo deshidratado aún en estado pastoso, fluía y se adaptaba en los espacios disponibles.

Transcurridos sesenta días desde el llenado de los dos cilindros, se ha verificado la inexistencia de lixiviados en los dos reactores, habiéndose registrado en este período una precipitación total de 116 mm (período: 4 de julio del 2008 – 21 de octubre del 2008). Debido a que los procesos físico-químico y biológicos al interior de un relleno sanitario son lentos y a largo plazo, se recomienda que ETAPA prosiga con el monitoreo y control de las unidades experimentales, de tal forma de verificar en el tiempo cantidades y calidad de los percolados, y así determinar si existe la incidencia de los lodos en la composición del lixiviado.



Figura 29: Reactores experimentales una vez concluida la fase de llenado (izq. desechos sólidos más lodo deshidratado – der. únicamente desechos sólidos)



Figura 30: Unidades experimentales cubiertas y en proceso de evaluación

3.5 Modelo de gestión

3.5.1 Costos de transporte y requerimientos de infraestructura

Los costos diarios de transporte y disposición final del lodo deshidratado en el relleno sanitario de la ciudad ascenderían a 1270 dólares (464000 dólares/año) considerándose 57 t/d al 25% ST, concentración que estaría fuera de la normativa, por lo que es necesario un secado adicional.

A partir de la aplicación de las ecuaciones ocho y nueve, se ha determinado que el peso del lodo alcanza su valor mínimo en 80 d en el caso de las muestras agitadas y 98 d para las muestras inalteradas, con lo que los costos diarios por transporte y disposición final se establecerían en 430 dólares y 434 dólares respectivamente.

Con los valores antes obtenidos, se ha efectuado un análisis de costo mínimo considerándose los costos de transporte y disposición final, y los costos en los cuales se incurre para la edificación necesaria para la post-deshidratación de los lodos, habiéndose determinado que la opción que

presenta el costo mínimo corresponde a la agitación de los lodos y un período de almacenamiento de 56 días en el que se alcanzaría una concentración del 74%ST (Tabla 9)(Fig. 31), lo cual representa un costo diario por transporte y disposición final de 489 dólares (39% del valor obtenido sin considerar la etapa de post-deshidratación), a más de los beneficios ambientales que se conseguirán debido a la disminución en kilómetros de recorrido, con el consiguiente menor consumo de combustibles y emanación de gases y ruido.

TIEMPO ^(a) (d)	VALOR ACTUAL NETO	
	LODO AGITADO	LODO SIN AGITAR
0	3506101	3506101
25	2683048	2946216
40	2380196	2792027
50	2271592	2681423
53	2256685	2640832
54	2253638	2626775
55	2251561	2612619
56	2250452	2598496
58	2251133	2570981
60	2255633	2545615
70	2330779	2491777
80	2472899	2562062
100	2794327	2805026
150	3597899	3608598
200	4401470	4412169

a: Número de días de almacenamiento del lodo deshidratado para la post-deshidratación

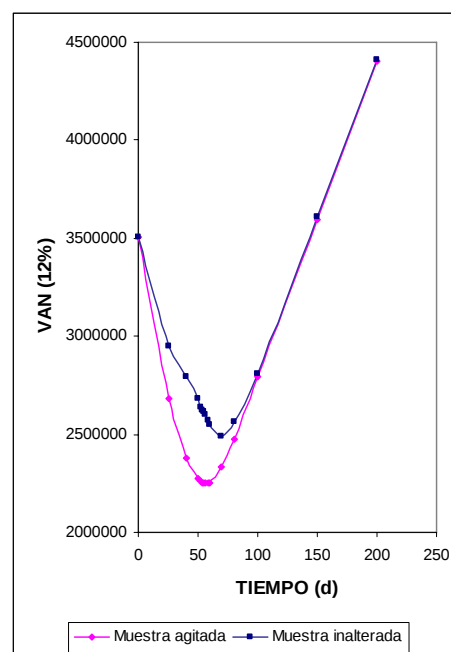


Tabla 9: Costo mínimo de transporte, disposición final e infraestructura

Figura 31: Costo mínimo de transporte, disposición final e infraestructura

3.5.2 Disponibilidad y aptitud de terrenos en el área de influencia económica del proyecto

Área de influencia económica

La distancia máxima a la cual ETAPA puede transportar los lodos y entregar a los agricultores es de 60 km, considerando el período de almacenamiento de 56 días en el cual el lodo disminuiría su peso hasta 22 t/d. Con la información obtenida se ha definido el área económica del proyecto (Fig. 32) a partir de la longitud de recorrido en vías y con los hitos limitantes establecidos, observándose que dentro del área seleccionada existen 17 cantones fuera de la jurisdicción y ámbito de actuación de ETAPA (Fig. 33).

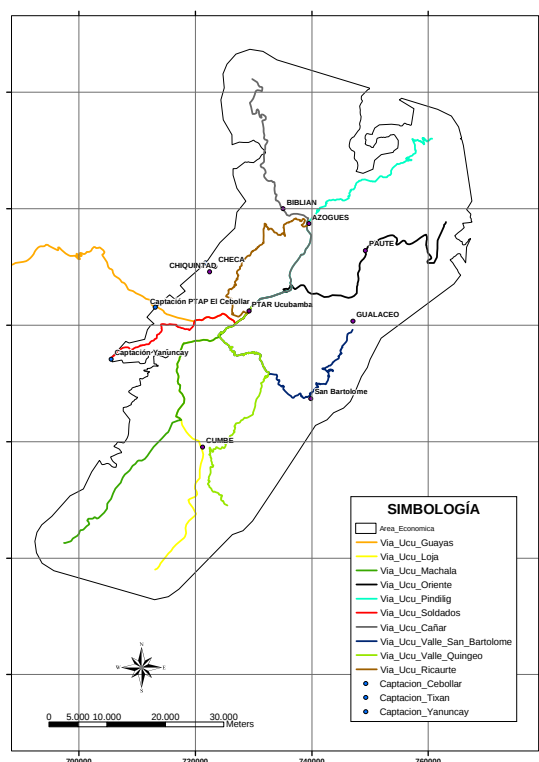


Figura 32: Área económica del proyecto (UDA - COPOE, 2004. Centros Poblados de la Cuenca del Río Paute. Escala 1:25 000, Fuente: UMACPA 1996, Universidad del Azuay. Cuenca, Ecuador;; UDA. 2004. Ejes de vías principales de la Cuenca del Río Paute. Escala 1:50 000, Fuente: Instituto Geográfico Militar, 1971 – 1992, Universidad del Azuay, 2004. Cuenca, Ecuador)

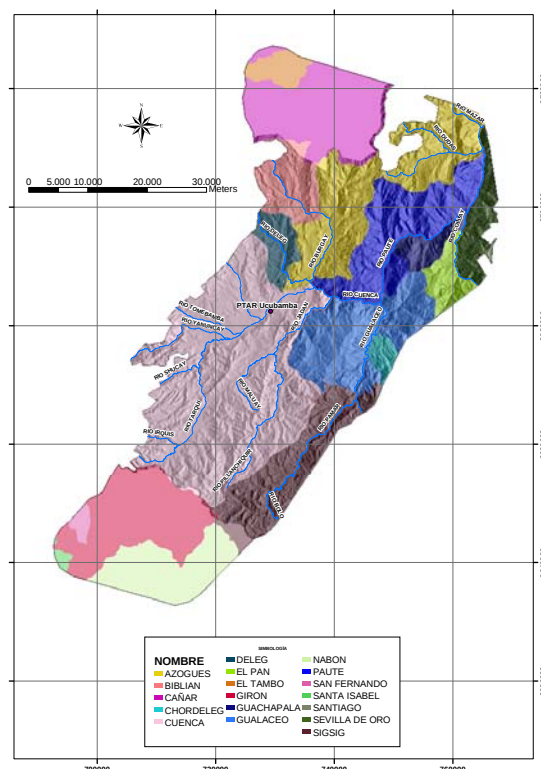


Figura 33: Cantones en el área de influencia del proyecto (UDA - COPOE. Ríos Principales de la Cuenca del Río Paute. Escala 1: 25 000. Universidad del Azuay. Cuenca, Ecuador; UDA - COPOE, 2003. División Política Administrativa Cantonal de la Cuenca del Río Paute. Escala 1:250 000, Fuente: ODEPLAN 2002, periodo 2000- 2002, Universidad del Azuay. Cuenca, Ecuador.)

Macronutrientes disponibles en el lodo

Los cálculos Nitrógeno disponible en el lodo han sido efectuados considerando un factor de mineralización del Nitrógeno Orgánico del 20% y una pérdida del Nitrógeno Amoniacal del 40% en la fase de deshidratación (*Tabla 10*), en tanto que para el Fósforo y el Potasio se ha considerado una pérdida en la deshidratación del 61% y 36%, y una biodisponibilidad del 50% y 100% respectivamente. La cantidad de lodo deshidratado a ser aplicado por hectárea en función del macronutriente limitante, considerando la producción diaria de lodo en la PTAR Cuenca, oscila entre 0,14 d y 2,23 d para el Nitrógeno, 0,39 d y 2,08 d para el Fósforo, y, 0,75 d y 1,29 d para el Potasio (*Tabla 11*).

ESTRATO SUPERIOR		ESTRATO INFERIOR	
NITRÓGENO			
Fracción de Mineralización del Nitrógeno (FM):		20%	
Nitrógeno Kjeldahl (NKT):		20400 mg N /kg ST	Nitrógeno Kjeldahl (NKT): 15800 mg N /kg ST
Nitrógeno Amoniacal en el lodo crudo (NH ₄):		4400 mg N /kg ST	Nitrógeno Amoniacal en el lodo crudo (NH ₄): 3800 mg N /kg ST
Pérdida de NH ₄ en la deshidratación:		40%	Pérdida de NH ₄ en la deshidratación: 40%
Nitrógeno Amoniacal en el lodo deshidratado (NH ₄):		2640 mg N /kg ST	Nitrógeno Amoniacal en el lodo deshidratado (NH ₄): 2280 mg N /kg ST
Nitrógeno Orgánico:		16000 mg N /kg ST	Nitrógeno Orgánico: 12000 mg N /kg ST
Nitrógeno disponible en el lodo deshidratado (Nd):		5,84 kg N/t ST	4,68 kg N/t ST
FÓSFORO			
Fracción disponible del Fósforo:		50%	
Fósforo (P ₂ O ₅) en el lodo crudo:		18 kg P ₂ O ₅ /t ST	Fósforo (P ₂ O ₅) en el lodo crudo: 14 kg P ₂ O ₅ /t ST
Pérdida de P en la deshidratación:		61%	Pérdida de P en la deshidratación: 61%
Fósforo (P ₂ O ₅) en el lodo deshidratado:		7,1 kg P ₂ O ₅ /t ST	Fósforo (P ₂ O ₅) en el lodo deshidratado: 5,4 kg P ₂ O ₅ /t ST
Fósforo aprovechable (P ₂ O ₅):		3,6 kg P ₂ O ₅ /t ST	Fósforo aprovechable (P ₂ O ₅): 2,7 kg P ₂ O ₅ /t ST
POTASIO			
Fracción disponible del Potasio:		100%	
Potasio (K ₂ O) en el lodo crudo:		4,4 kg K ₂ O/t ST	Potasio (K ₂ O) en el lodo crudo: 3,4 kg K ₂ O/t ST
Pérdida de K en la deshidratación:		36%	Pérdida de K en la deshidratación: 36%
Potasio (K ₂ O) en el lodo deshidratado:		2,8 kg K ₂ O/t ST	Potasio (K ₂ O) en el lodo deshidratado: 2,2 kg K ₂ O/t ST
Potasio aprovechable (K ₂ O):		2,8 kg K ₂ O/t ST	Potasio aprovechable (K ₂ O): 2,2 kg K ₂ O/t ST

Tabla 10: Macronutrientes disponibles en el lodo

Cantidad recomendada (K ₂ O) ^(a) (INIAP, 1979)		Tasa de aplicación de lodo (TA) ^(b) (t/ha)		Volumen de lodo requerido ^(c) (m ³ /ha)		Días de producción de lodo por hectárea ^(d)		Déficit (P ₂ O ₅)		Déficit (N)	
Cultura	(kg K ₂ O/ha)	ES	EIN	ES	EIN	ES	EIN	ES	EIN	ES	EIN
Maíz (Sierra)	30	11	14	10	13	0,75	0,97	36%	38%	37%	35%
Pastos (Litoral)	40	14	19	13	17	1,00	1,29	15%	17%	30%	28%

a) Nutriente limitante - Potasio

Cantidad recomendada (N _p) ^(a) (INIAP, 1979)		Tasa de aplicación de lodo (TA) ^(b) (t/ha)		Volumen de lodo requerido ^(c) (m ³ /ha)		Días de producción de lodo por hectárea ^(d)		Déficit (P ₂ O ₅)		Déficit (K ₂ O)	
Cultura	(kg N/ha)	ES	EIN	ES	EIN	ES	EIN	ES	EIN	ES	EIN
Ajo y Cebolla	80	14	17	13	16	0,95	1,19	39%	43%	52%	54%
Alfalfa	30	5,1	6,4	4,7	5,9	0,36	0,45	77%	79%	71%	72%
Caña de Azúcar (Sierra)	150	26	32	24	29	1,79	2,23	8%	14%	52%	54%
Cebada	40	6,8	8,5	6,3	7,8	0,48	0,59	59%	62%	36%	39%
Flores	75	13	16	12	15	0,89	1,12	69%	71%	52%	54%
Fréjol y Habas (Sierra)	60	10	13	9,4	12	0,71	0,89	8%	14%	28%	31%
Maíz - Fréjol (Asociado)	40	6,8	8,5	6,3	7,8	0,48	0,59	39%	43%	68%	69%
Papa	150	26	32	24	29	1,79	2,23	39%	43%	28%	31%
Pastos en asociación (Sierra)	30	5,1	6,4	4,7	5,9	0,36	0,45	77%	79%	76%	77%
Tomate (Sierra)	100	17	21	16	20	1,19	1,49	39%	43%	52%	54%
Trigo	60	10	13	9,4	12	0,71	0,89	39%	43%	28%	31%
Yuca	80	14	17	13	16	0,95	1,19	18%	24%	62%	63%
Abaca (1500 plantas/ha)	150	26	32	24	29	1,79	2,23	24%	28%	68%	69%
Algodón	60	10	13	9,4	12	0,71	0,89	8,2%	14%	28%	31%
Avena	40	6,8	8,5	6,3	7,8	0,48	0,59	51%	54%	52%	54%
Camote	60	10	13	9,4	12	0,71	0,89	8%	14%	52%	54%
Cocotero (224 plantas/ha)	22	3,8	4,8	3,5	4,4	0,27	0,33	24%	28%	52%	54%
Higuerilla	20	3,4	4,3	3,1	3,9	0,24	0,30	39%	43%	52%	54%
Maní	20	3,4	4,3	3,1	3,9	0,24	0,30	59%	62%	76%	77%
Cultura	(kg N)	(t)		(m ³)		ES		EIN		ES	
		ES	EIN	ES	EIN	ES		EIN		ES	
Café y cacao (800 plantas)(transplante)	12	2,1	2,6	1,9	2,4	0,14		0,18		39%	
										64%	
										43%	
										64%	

b) Nutriente limitante - Nitrógeno

Cantidad recomendado (P_2O_5) ^(a) (INIAP, 1979)		Tasa de aplicación de lodo (TA) ^(b) (t/ha)		Volumen de lodo requerido ^(c) (m ³ /ha)		Días de producción de lodo por hectárea ^(d)		Déficit (N)		Déficit (K_2O)	
Cultura	(kg P_2O_5 /ha)	ES	EIN	ES	EIN	ES	EIN	ES	EIN	ES	EIN
Ajonjolí	20	5,6	7,5	5,1	6,9	0,39	0,52	46%	42%	22%	20%
Arroz (secano)	20	5,6	7,5	5,1	6,9	0,39	0,52	67%	65%	22%	20%
Fréjol (Costa)	20	5,6	7,5	5,1	6,9	0,39	0,52	46%	42%	48%	46%
Maíz (Litoral)	30	8,4	11	7,7	10	0,58	0,78	18%	13%	22%	20%
Piña	40	11	15	10	14	0,78	1,04	35%	30%	79%	79%
Sandía (1500 plantas/ha)	60	17	22	15	21	1,17	1,56	18%	13%	58%	57%
Sorgo	20	5,6	7,5	5,1	6,9	0,39	0,52	18%	13%	48%	46%
Soya	20	5,6	7,5	5,1	6,9	0,39	0,52	18%	13%	48%	46%
Tabaco	50	14	19	13	17	0,97	1,30	18%	13%	74%	73%
Tomate (Costa)	80	22	30	21	27	1,56	2,08	13%	6,8%	38%	36%
Cultura	(kg P_2O_5)	(t)		(m ³)				ES	EIN	ES	EIN
		ES	EIN	ES	EIN						
Banano (1300 plantas)	33	9,1	12	8,4	11	0,63	0,84	80%	78%	80%	80%

a: Tasa recomendada para suelo con contenido de nutrimento medio

b: Valores calculados con los promedios obtenidos en la caracterización estratigráfica

c: Volumen de lodo calculado con los ST en el día de menor costo (74%ST)

d: Número de días de producción de lodo deshidratado con 74%ST, considerando un período de 365 días

ES: Lodo del estrato superior

EIN: Lodo del estrato inferior

c) Nutriente limitante - Fósforo

Tabla 11: Peso y volumen de lodo deshidratado a ser aplicado en el sector agrícola en función del macronutriente limitante. a) Potasio, b) Nitrógeno, y c) Fósforo

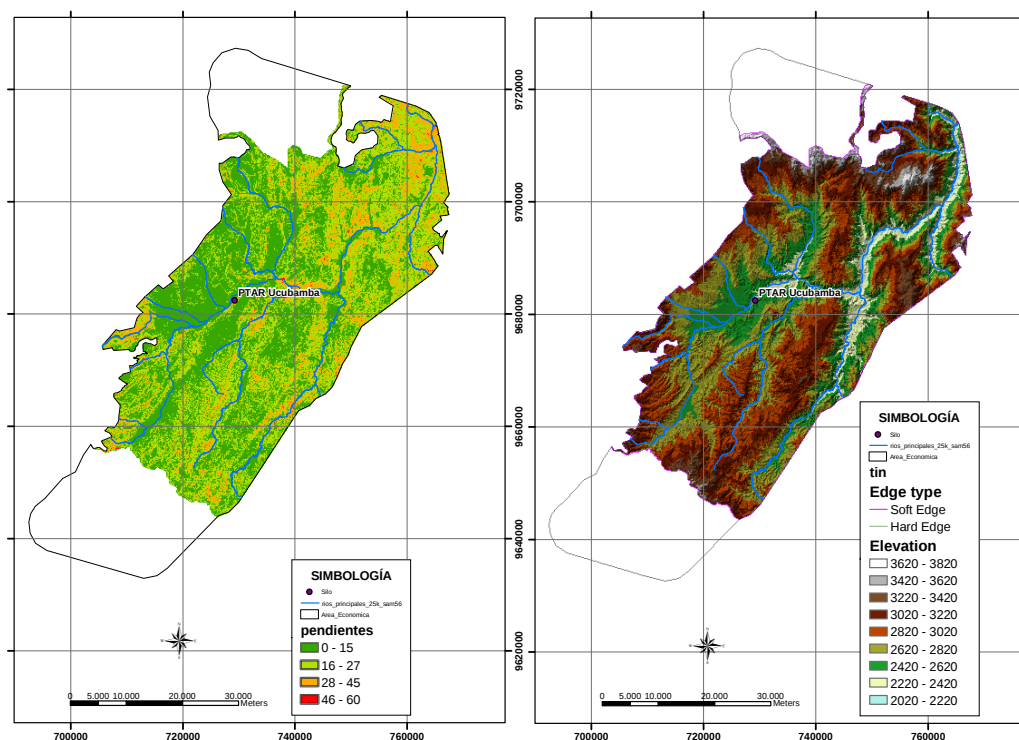
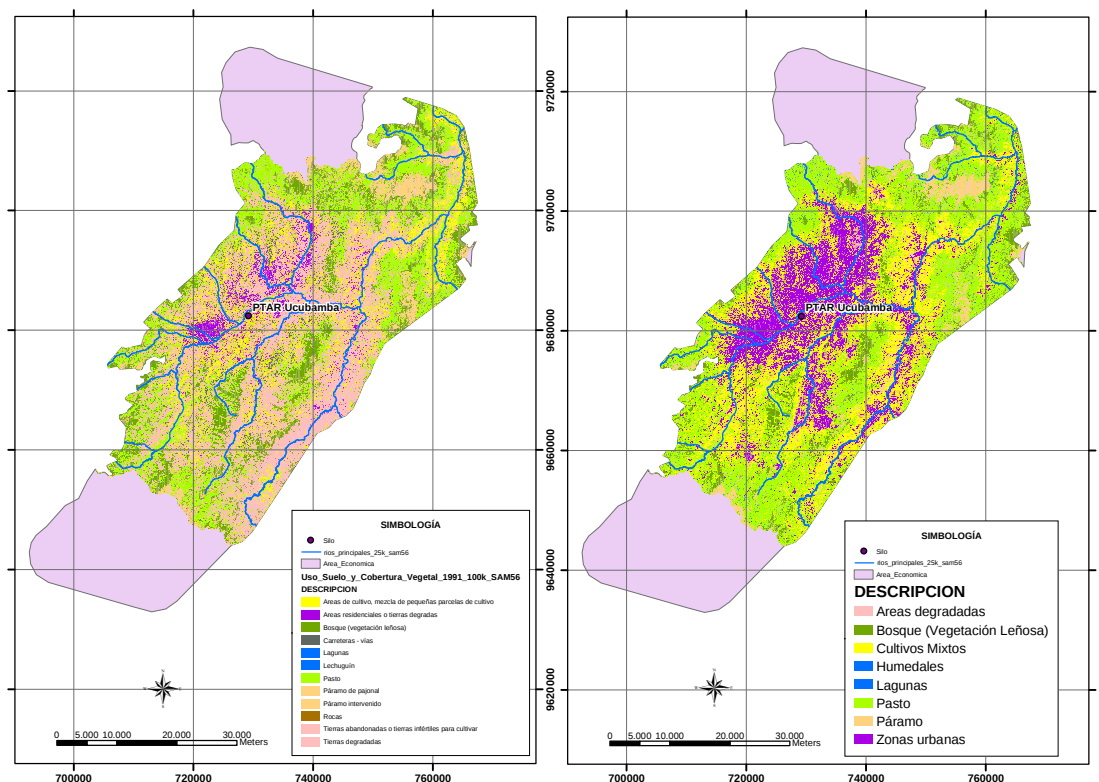
Uso del suelo y cobertura vegetal en el área de influencia económica del proyecto

Se ha determinado a partir de la información de la cuenca del Río Paute, que el área de cultivos en la zona definida del proyecto se ha incrementado en el período 1991-2001 del 38% al 42% (Tabla 12), con lo que es de esperarse que en el presente estas áreas sean iguales o superiores debido a la demanda existente desde los centros poblados. En lo referente a las zonas urbanas, se puede concluir que estas han crecido hasta un 9,2% en el mismo período, observándose (Fig. 34) el avance de la urbanización que ha venido a sustituir y desplazar a las áreas de cultivo.

AÑO 1991			AÑO 2001		
Cobertura	Área (ha)	Área (%)	Cobertura	Área (ha)	Área (%)
Bosque (vegetación leñosa)	37290	17	Bosque (vegetación leñosa)	29515	13
Páramo de pajonal	11602	5,2	Páramo	12311	5,6
Páramo intervenido	453	0,20			
Áreas de cultivo, mezcla de pequeñas parcelas de cultivo (maíz, fréjol) con pastos	82966	38	Cultivos Mixtos	93963	42
Lagunas	12	0,005	Lagunas	0,63	0,0003
Lechuguín	10	0,005	Humedales	3026	1,4
Pasto	35795	16	Pasto	45367	20
Rocas	252	0,11	Rocas	-	-
Tierras degradadas	2685	1,2	Áreas degradadas	16855	7,6
Carreteras - vías	3822	1,7	Carreteras - vías	-	-
Tierras abandonadas o tierras infértiles para cultivar	38214	17	Tierras abandonadas o tierras infértiles para cultivar	-	-
Áreas residenciales o tierras degradas	8122	3,7	Zonas urbanas	20302	9,2

Tabla 12: Cobertura del suelo. Años 1991 y 2001

Del análisis de la información de la Tabla 11 y Tabla 12, se desprende que existe suficiente disponibilidad de terrenos en el sector agrícola para la aplicación del lodo a pesar de que no se encuentran incluidas las áreas fuera de la cuenca del río Paute debido a que la información de estas zonas no presenta las mismas características y detalle que las estudiadas. Un análisis y selección final de las áreas agrícolas en donde es factible la aplicación de lodo, deberá considerar la legislación vigente, especialmente la Legislación Forestal, cantidad de lodo a ser aplicado en función de las características del suelo relacionadas con los nutrientes y pH, cantidad de lodo a ser aplicado en función de metales contenidos en el lodo deshidratado, características biológicas y macronutrientes en el lodo post-deshidratado, facilidades del acceso en los períodos de aplicación, proximidad a centros poblados, dirección predominante de vientos, aprobación y consentimiento de propietarios, instrucción y capacitación al sector agricultor, captaciones agua y sus áreas de protección, y geología, así como limitantes propias existentes en cada una de las zonas particulares de aplicación. Complementariamente a lo descrito, deberá evaluarse factores relacionados con la topografía e hidrología que son considerados en otros sitios en donde se dispone de normativa para la aplicación de lodos, y que excluyen franjas de protección en vías, cuerpos de agua y divisores, así como proximidad al nivel freático, y áreas en donde la pendiente es mayor al 15% que es el caso que mayoritariamente se presenta en la zona en estudio (Fig. 35).



El modelo de gestión técnico, económico y ambiental de los lodos deshidratados de la PTAR Cuenca, esquematizado en la Figura 36, ha sido desarrollado relacionando cada una de las variables consideradas en el estudio y tiene como premisa: mitigar daños o efectos adversos al ambiente y a la población, así como una adecuada gestión de recursos.

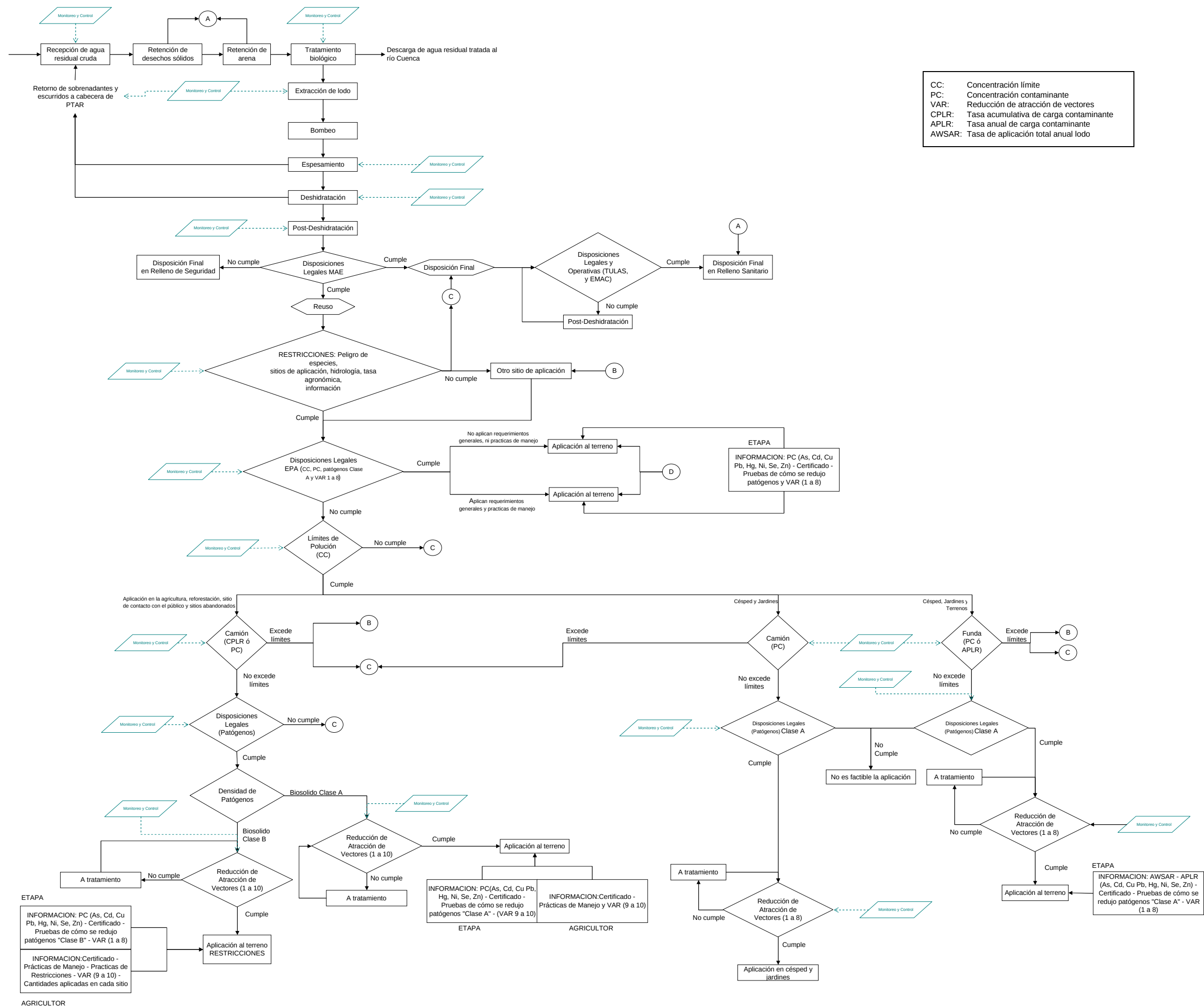


Figura 36: Modelo de gestión técnico, económico y ambiental de los lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba

4 Conclusiones

4.1 Análisis de datos históricos

Los resultados obtenidos evidencian las bajas concentraciones de Nitrógeno (NH_4 y N. Orgánico), Fósforo y Potasio encontradas en los lodos crudos depositados en la PTAR Cuenca.

La carga de Al, Cu, Pb y Zn removida en la PTAR Cuenca es similar a la proyectada en los lodos crudos depositados, en tanto que la carga de Ni y Cd proyectada en los lodos representa el 62% y 20% del total removido en el mismo período.

Los resultados y tendencias obtenidos para los Coliformes Totales y Termotolerantes en las Lagunas Aeradas y Facultativas, reflejan la calidad del agua residual en cada una de las fases de tratamiento y en consecuencia la incidencia de su ubicación y finalidad.

4.2 Caracterización estratigráfica

El contenido de ST de los estratos intermedio e inferior, es similar a la concentración de 13,48% reportada para la PTAR Cuenca (ETAPA, 2005), por lo que se verifica que el volumen de lodos acumulado en las lagunas de estabilización es superior al previsto, por lo que previo al inicio del funcionamiento del sistema previsto por ETAPA, se efectúe una reprogramación de las labores de extracción y deshidratación, de tal forma que se alcancen los estándares de evacuación y disposición final previstos en el proyecto.

En virtud de que la metodología a emplear para la remoción de lodo en la PTAR Cuenca contempla las operaciones de dragado desde la parte superior del estrato, el valor agronómico de los lodos en lo relacionado a N, P y K será menor a medida que se profundice en la extracción, por lo que será necesario ir incrementando la cantidad de lodo a incorporar al terreno, de tal forma de satisfacer las necesidades de las diferentes culturas. La diferencia entre la cantidad del estrato superior e inferior es de 26%, 33% y 29% para el nitrógeno, fósforo y potasio respectivamente. Por otro lado es necesario desarrollar parámetros que tomen en consideración las condiciones locales, siendo necesario llevar adelante trabajos que permitan conocer la biodisponibilidad de fósforo, tasas de volatilización del amonio y de mineralización del nitrógeno orgánico.

Igual consideración deberá ser efectuada para los Coliformes Termotolerantes, debido a que las características biológicas podrían verse afectadas; de ser este el caso, será necesario aplicar uno de los procesos para reducción de patógenos (digestión aerobia, secado, digestión anaerobia, compostaje, estabilización con cal), de tal forma de alcanzar los estándares previstos para un biosólido "Clase B".

4.3 Determinación experimental de la dosis optima de polielectrolito para deshidratación

La eficiencia reportada para filtros banda es menor a la de los filtros prensa de placas, por lo que sería de esperarse que el contenido de ST a obtener en la PTAR Cuenca sea menor al

obtenido en las pruebas experimentales, sin embargo a criterio de los autores no existirán diferencias importantes. Las concentraciones de ST obtenidas para la dosis de 4 kg/t, se encuentran enmarcadas en la normativa nacional para la co-disposición en el relleno sanitario de la ciudad y son superiores a las establecidas en los criterios de diseño para co-disposición de lodos en rellenos sanitarios municipales ($ST \geq 20\%$) independientemente de si el lodo es dispuesto conjuntamente con los desechos sólidos o es utilizado como capa de cobertura.

Existe una cantidad importante de desechos sólidos en el lodo, y los materiales observados reflejan el alcantarillado de tipo combinado existente en la ciudad.

Las concentraciones de macronutrientes (N, P y K) y STV son bajas, reflejando de esta forma la calidad del afluente, la edad del lodo y el sistema de tratamiento empleado en la depuración de las aguas residuales. La posible programación del uso benéfico del lodo de la PTAR Cuenca deberá considerar la predominancia de N. Orgánico en los lodos debido a que este debe sufrir un proceso de mineralización, para solo entonces ser absorbido por las plantas.

Los valores de pH obtenidos, no interferirán en los procesos de degradación anaerobia en el relleno sanitario de la ciudad de Cuenca, y no promoverá la lixiviación de los metales.

Las concentraciones Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn obtenidas (lodo crudo acondicionado y en el lodo deshidratado), son inferiores a la concentración límite y a la concentración contaminante establecidas por la legislación Norteamericana para la aplicación de lodo en el terreno.

El agua de escurrido no ocasionará inconvenientes en el sistema de tratamiento de la fase líquida una vez que sea recirculada a cabecera de la PTAR, sin embargo deberá en una primera instancia evaluarse y corroborarse los resultados y relaciones obtenidas en este estudio, de tal forma que no se incurra en cargas que pudieran resultar perjudiciales para el sistema.

La ganancia en la concentración de ST en la post-deshidratación natural de los lodos, facilitará las labores de manipulación y si es del caso de envasado, a la vez que se constituye en una alternativa válida para dar cumplimiento a la legislación para la co-disposición, habiéndose encontrado que la concentración de STV no sufrió variación. No se encontró una relación entre la temperatura a la cual estuvo sometida el lodo en esta etapa y la pérdida de peso en las muestras de lodo deshidratado, por lo que pruebas adicionales deberán ser llevadas delante de tal forma de determinar la existencia de relaciones con otros parámetros meteorológicos y variables como el peso y el área libre. Para asegurar la integridad de quienes están sujetos al contacto con los lodos (manejadores y consumidores), pruebas para la determinación de patógenos y su inactivación deberán ser llevadas adelante, así como para verificar los contenidos finales de macronutrientes con énfasis en el Nitrógeno Amoniacal.

4.4 Determinación experimental de ocupación del relleno sanitario

Se deduce que la capacidad de recepción de los desechos sólidos en el relleno sanitario de la ciudad en beneficio de los lodos ascendería al 8% considerando un contenido del 26%ST, lo cual es inferior al 14,5% proyectado en el Informe de Proyecto “Disposición Final de los lodos de las Plantas Potabilizadoras y Depuradora de ETAPA” efectuado en el año 2007, esperándose una incidencia aún menor, debido a la reducción de volumen del lodo en el proceso de post-

deshidratación y al equipamiento empleado en el relleno para la compactación diaria de los desechos.

4.5 Modelo de Gestión

La factibilidad efectuada en este estudio, permitirá a ETAPA emprender con un estudio técnico y económico-financiero, que involucre diseños definitivos, determine disponibilidad de áreas para la post-deshidratación, así como el equipamiento necesario para su manejo y manipulación.

El uso de lodo deshidratado en el sector agrícola podrá ser efectuado únicamente de manera parcial, en virtud de que la continuidad en su evacuación, no necesariamente coincidirá con los períodos de fertilización y siembra en los cuales podrían ser requeridos por los agricultores, al igual que debería emprenderse con actividades mediante las cuales se conozca al detalle el emplazamiento de las diferentes culturas en el área de influencia del proyecto, a más de los estudios complementarios requeridos.

El uso de lodo deshidratado en el sector agrícola, requerirá necesariamente el complemento con fertilizantes simples que estarán en función del tipo de cultivo y del macronutriente limitante. De mantener el lodo post-deshidratado las características de un biosólido Clase B, deberá instruirse adecuadamente a los agricultores, la improcedencia de efectuar cultivos en períodos de hasta 38 meses luego de la aplicación, dependiendo el tipo de cultivo, así como de las prácticas y cuidados necesarios para el manejo, almacenamiento e incorporación del lodo al terreno, práctica prevista en lugares en donde se efectúa el uso del lodo en el sector agrícola.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento y reconocimiento a S. López, R. Vélez, J. León, G. Cordero, J. Villavicencio, F. Sarmiento y D. Idrovo directivos, funcionarios y ex directivo de la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca – ETAPA por la confianza depositada y el apoyo brindado para este proyecto, Y. Torres, R. Tenorio, C. Arízaga, M. Chérrez y D. Arce que colaboraron en la realización de los análisis de laboratorio, A. Neira por su invaluable apoyo y guía en la investigación, G. Chacón y A. Crespo profesores de la Universidad del Azuay por sus observaciones y comentarios, L. Alvarez por facilitar información meteorológica, D. Guartatanga, S. Pangól, M. Peñafiel, J. Guamán y S. Tumbaco por el apoyo técnico-logístico aportado en la ejecución de las pruebas experimentales, M. Pinos, J. Quishpi, J. Méndez, E. Ullauri, C. Galárraga, J. Lozano, C. Crespo, L. Méndez y G. Quishpi por el apoyo brindado en la toma de muestras y realización de pruebas.

BIBLIOGRAFÍA:

- Alvarado A. 2005. Drying of Stabilisation Pond Sludge and its Quality for Reuse in Land Application. UNESCO-IHE-Institute for Water Education. Netherlands 66 pp.
- Andreoli C, von Sperling M, Fernandez F. 2001. Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final. DESA-UFGM-SANEPAR. Belo Horizonte, Brasil. 484 pp.
- APHA, AWWA, WPCF. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20ª ed. Estados Unidos.
- Eckenfelder W. 1966. Industrial Water Pollution Control. Mc Graw Hill. United States, Singapore. 400 pp.
- Crites R, Tchobanoglous G. 2000. Sistemas de Manejo de Aguas Residuales para Núcleos Pequeños y Descentralizados. Mc Graw Hill. Estados Unidos, Colombia. 1082 pp.
- Czysz W, Denne A, Rump H, Schneider W, Staudte E, Supperl W, Blitz E, Böhnke B, Doetsch P, Dreschmann P, Pöppinghaus K, Siekmann K, Thomas S. 1991. Manual de Disposición de Aguas Residuales. Cooperación Técnica de la República Federal de Alemania, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Alemania, Perú. 1077 pp.
- Degremont. 1979. Manual Técnico del Agua. 4th ed. Bilbao, España. 1216 pp.
- Da Silva S, Fernandes F, Soccol V, Morita D. 2001. Principais Contaminantes do Lodo. En: Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final. DESA-UFGM-SANEPAR. Belo Horizonte, Brasil. 69-121.
- De Lara A, Andreoli C, Pegorini E. 2001. Avaliação dos Impactos Ambientais e Monitoramento da Disposição Final do Lodo. En: Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final. DESA-UFGM-SANEPAR. Belo Horizonte, Brasil. 465-483.
- Dos Santos H. 2001. Normatização para o Uso Agrícola dos Biossólidos no Exterior e no Brasil. En: Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final. DESA-UFGM-SANEPAR. Belo Horizonte, Brasil. 425-464.
- EMAC. 2008. Estudios y Diseños de la Fase Emergente de la Etapa Norte II del Relleno Sanitario de Pichacay: Memoria Técnica y Descriptiva. Cuenca, Ecuador. 52 pp.
- Environmental Protection Agency. 1987. Design Manual. Dewatering Municipal Wastewater Sludges. 625/1-87/014. United States Environmental Protection Agency. Washington, United States. 193 pp.
- _____. 1983. Design Manual. Municipal Wastewater Stabilization Ponds. 625/1-83-015. United States Environmental Protection Agency. Washington, United States. 327 pp.
- _____. 1985. Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling. 2ª ed. 600/3-85/040. United States Environmental Protection Agency. Washington, United States. 455 pp.
- _____. 1995. Process Design Manual. Surface Disposal of Sewage Sludge and Domestic Septage. 625/R-95/002. United States Environmental Protection Agency. Washington, United States. 300 pp.
- _____. 2001. Part 503 – Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge. Fuente de documento electrónico en Internet (en línea), <www.epa.gov/region8/../../../../water/biosolids/biosolidsdown/40cfr503-july-2001.pdf>. Consulta: 29 de julio del 2008.
- ETAPA. 1999. Programa de Control de la Contaminación por Vertidos Líquidos Industriales en el Cantón Cuenca. Cuenca, Ecuador. 80 pp.
- _____. 1999a. Resultados del Mes de Noviembre de 1999. Cuenca, Ecuador. 26 pp.
- _____. 1999b. Resultados del Mes de Diciembre de 1999. Cuenca, Ecuador. 26 pp.
- _____. 2000. Resultados del Mes de Enero del 2000. Cuenca, Ecuador. 25 pp.
- _____. 2000a. Primer Informe Semestral del Funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Cuenca, Ecuador. 36 pp.
- _____. 2002. Información sobre la Generación y Acumulación de lodos en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Cuenca, Ecuador. 73 pp.
- _____. 2002a. Información sobre la Generación y Acumulación de lodos en las Lagunas Aeradas de la P.T.A.R. Cuenca. Cuenca, Ecuador. 55 pp.

- _____. 2003. Información sobre la batimetría efectuada en la P.T.A.R. – Ucubamba. Cuenca, Ecuador. 111 pp.
- _____. 2003b. Informe Global del Funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba (Período: Noviembre de 1999 – Diciembre del 2002). Cuenca, Ecuador. 124 pp.
- _____. 2004. Diseños Definitivos del Sistema de Tratamiento de Lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba. TYPESA. Cuenca, Ecuador.
- _____. 2005. Informe Global del Funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (Período: Noviembre de 1999 – Diciembre del 2004). Cuenca, Ecuador. 191 pp.
- _____. 2005a. Información sobre la acumulación y volumen de lodos en la P.T.A.R. – Ucubamba. Cuenca, Ecuador. 193 pp.
- _____. 2007. Informe de Proyecto: Disposición final de los lodos de las plantas potabilizadoras y depuradora de ETAPA. EMAC-ETAPA. Informe Inédito. Cuenca, Ecuador. 99 pp.
- _____. 2007a. Informe de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – Situación a Diciembre del 2006. Cuenca, Ecuador. 242 pp.
- _____. 2008. Resultados de la Evaluación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (Período: Noviembre de 1999 – Diciembre del 2007). Cuenca, Ecuador. 232 pp.
- _____. 2008a. Estudio de Alternativas para el Transporte de Lodos Deshidratados desde la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba hasta el Relleno Sanitario de Pichacay. Informe Inédito. Cuenca, Ecuador. 284 pp.
- Fernandes F, Dias D, Andreoli, Pereira S. 2001. Avaliação de Alternativas e Gerenciamento do Lodo na ETE. En: Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final. DESA-UFGM-SANEPAR. Belo Horizonte, Brasil. 299-317.
- Galarza S, Román M. 2003. Alternativa de Uso de los Lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (ETAPA) en Cerámica. Tesis de Ingeniero Químico. Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador. 140 pp.
- Gaudy A, Gaudy E. 1980. Microbiology for Environmental Scientists and Engineers. Mc Graw Hill. Estados Unidos. 736 pp.
- Gonçalves RF, Pereira MR, Franca FR. 2000. Características Físico-químicas e Microbiológicas do Lodo de Lagoas. En: Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (Eds.). Gerenciamento do Lodo de Lagoas de Estabilização não Mecanizadas. ABES. Rio de Janeiro, Brasil. 25-37.
- Heinss U, Strauss M. 1999. Co-treatment of Faecal Sludge and Wastewater in Tropical Climates. EAWAG/SANDEC. Swiss Federal Institute for Environmental Science & Technology/Dept. for Water and Sanitation in Developing Countries: documento de fuente electrónica en internet (en línea) http://www.sandec.ch/FaecalSludge/Documents/Co-treat.FS_WW99.pdf. Consulta: 14 de febrero del 2007.
- INIAP. 1979. Guía de Recomendaciones de Fertilización para los Principales Cultivos del Ecuador. Quito, Ecuador. 36 pp.
- Kellner E, Cleto E. 1998. Lagoas de Estabilização: Projeto e Operação. ABES. Río de Janeiro, Brasil. 244 pp.
- König A. 2000. Biología de las Lagunas de Estabilización: Algas. En: Sistemas de Lagunas de Estabilización: Como utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de riego. Mc Graw Hill. Santa Fe de Bogotá, D. C., Colombia. 44-67.
- Luduvic M, Fernandes F. 2001. Principais Tipos de Transformação e Descarte do Lodo. En: Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final. DESA-UFGM-SANEPAR. Belo Horizonte, Brasil. 399-423.
- Metcalf & Eddy Inc. 1995. Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización. 3ª ed. Mc Graw Hill. Estados Unidos, España. 1485 pp.
- _____. 2004. Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. 4th ed. Mc Graw Hill. United States, Singapore. 1819 pp.
- Miki M, Andrigueti E, Alem P. 2002. Tratamento da Fase Sólida em Estações de Tratamento de Esgotos. En: Biosólidos Na Agricultura. 2ª ed. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade de São Paulo, Universidade Estadual Paulista. São Paulo, Brasil. 41-87 pp.

- PROSAB. 1999. Uso e Manejo do Lodo de Esgoto na Agricultura. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Rio de Janeiro, Brasil. 97 pp.
- PROSAB. 2000. Gerenciamento do Lodo de Lagoas de Estabilização não Mecanizadas. ABES. Rio de Janeiro, Brasil. 95 pp.
- Rolim S. 1990. Lagoas de Estabilização e Aeradas Mecanicamente: Novos Conceitos. CAGEPA. João Pessoa, Brasil. 388 pp.
- Rolim S. 2000. Sistemas de Lagunas de Estabilización: Como utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío. Mc Graw Hill. Santa Fe de Bogotá, D. C., Colombia. 370 pp.
- Romero J. 2000. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogota, Colombia. 1232 pp.
- Teixeira M. 2001. Higienização de Lodos. En: Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final. DESA-UFGM-SANEPAR. Belo Horizonte, Brasil. 261-297.
- Tomoyuki M, Baptista J, Alem P, Español I, De Campos P, Melfi A, De Melo W, Marques M. 2002. Biosólidos Na Agricultura. 2ª ed. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade de São Paulo, Universidade Estadual Paulista. São Paulo, Brasil. 468 pp.
- Von Sperling M., Gonçalves RF. 2001. Lodo de Esgotos: Características e Produção. En: Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final. DESA-UFGM-SANEPAR. Belo Horizonte, Brasil. 17-67.
- Von Sperling M. 2002. Lagoas de Estabilização. 2ª ed. DESA-UFGM. Belo Horizonte, Brasil. 196 pp.
- Yáñez F. 1990. Diseños Definitivos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba. ETAPA. Informe Inédito. Cuenca, Ecuador.
- _____. 1993. Lagunas de Estabilización: Teoría, Diseño, Evaluación y Mantenimiento. ETAPA. Cuenca, Ecuador. 421 pp.
- _____. 1994. Metodología Experimental para Modelos de Calidad del Agua de Ríos de Alta Montaña. ETAPA. Informe Inédito. Cuenca, Ecuador. 99 pp.
- _____. 2004. Informe No. 3: Pruebas Definitivas de Evaluación del rendimiento de los Aereadores y determinación de los requisitos de oxígeno en condiciones de acumulación de lodos en las lagunas aeradas de la PTAR de Ucubamba. ETAPA. Informe Inédito. Cuenca, Ecuador. 25 pp.
- Yoshiharu L. 2002. Características de Biosólidos produzidos em Lagoas de Estabilização. En: Biosólidos Na Agricultura. 2ª ed. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade de São Paulo, Universidade Estadual Paulista. São Paulo, Brasil. 125-131 pp.
- Yukie U, Lima W. 1989. Operação e Manutenção de Lagoas Anaeróbias e Facultativas. CETESB. Sao Paulo, Brasil. 91 pp.