

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

Escuela de Posgrado

Maestría en Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible

**DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL AGRÍCOLA DE LODOS
PROVENIENTES DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES DE COPARE
Y MAGOLLO, TACNA**

TESIS

PRESENTADA POR:

ING. JIMMY GIANFRANCO MORE VALDIVIA

Para optar el Grado Académico de:

**MAESTRO EN CIENCIAS (*MAGISTER SCIENTIAE*) CON MENCIÓN
EN GESTIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE**

TACNA - PERÚ

2015

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE
“DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL AGRÍCOLA DE LODOS
PROVENIENTES DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES DE COPARE
Y MAGOLLO, TACNA”

Tesis sustentada y aprobada el 09 de julio del 2014; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE :


Dra. Rina María ÁLVAREZ BECERRA

SECRETARIO :


Mgr. Martín Eloy CASILLA GARCÍA

MIEMBRO :

Mgr. Juan Heraldo VILOCHE BAZÁN (†)

ASESOR :


Dr. Alberto Savino PACHECO PACHECO

DEDICATORIA

A mis padres, Raquel Valdivia y Martín More, por brindarme su apoyo, comprensión y cariño, para que así cada día dé un paso más hacia mis metas y sueños.

A mi hermano Bruno Marcelo, impulso para seguir adelante.

A la memoria de mis queridos abuelos Ciro, Alberto y Dionicia, Q.E.P.D y D.D.G.

AGRADECIMIENTOS

- A Dios por guiarme por el mejor camino, y dirigir mis pasos y pensamientos hacia la consecución de mis metas.
- Al Ministerio de Educación (MINEDU) y su Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo (PRONABEC) y a la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (ESPG - UNJBG) por permitirme ser beneficiario de la “Beca Haya de La Torre - Segunda Convocatoria” y darme la oportunidad de seguir estudios de posgrado en nivel de Maestría.
- Al Dr. Alberto Pacheco Pacheco, asesor del presente trabajo de tesis, y a los miembros del jurado, Dra. Rina María Álvarez Becerra, Mgr. Martín Eloy Casilla García y Mgr. Juan Heraldo Viloche Bazán, quienes con su orientación y acertadas sugerencias mejoraron la presentación del presente trabajo.
- A Milner Pérez Pinedo, Erica Merino Maguiña, Candy Pisfil Palza y Teresa Lanchipa Ale, por su amistad y por facilitar el desarrollo y culminación del presente trabajo.
- Al personal técnico y administrativo del INPREX y de la EPS Tacna S.A.
- A todas aquellas personas que de alguna manera u otra han colaborado para que el presente trabajo haya culminado con éxito.

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
RESUMEN	xix
ABSTRACT	xx
INTRODUCCIÓN	01

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema	06
1.1.1 Antecedentes del problema	06
1.1.1 Problemática de la investigación.....	09
1.2 Formulación del problema	13
1.3 Justificación e importancia.....	13
1.4 Alcances y limitaciones	15
1.5 Objetivos.....	16

1.5.1	Objetivo general.....	16
1.5.2	Objetivos específicos.....	16
1.6	Hipótesis.....	17
1.6.1	Hipótesis general	17
1.6.2	Hipótesis específicas	17

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1	Antecedentes generales.....	18
2.1.1	Materia orgánica	18
2.1.1.1	Efectos de la materia orgánica en los suelos	21
2.1.1.2	Efectos de la materia orgánica en las plantas.....	23
2.1.2	Fertilización orgánica.....	24
2.2	Reseña histórica del tratamiento de aguas y lodos residuales ..	25
2.3	Aguas residuales.....	29
2.3.1	Características de las aguas residuales	29
2.3.2	Proceso de depuración de las aguas residuales.....	30
2.4	Lodos residuales	36
2.4.1	Producción de lodos	37
2.4.2	Tipos de lodos.....	42
2.4.2.1	Lodo primario	42

2.4.2.2	Lodo secundario.....	43
2.4.2.3	Lodo terciario.....	43
2.4.3	Características de los lodos.....	44
2.4.4	Tratamiento de lodos.....	49
2.4.5	Utilización agrícola de lodos.....	52
2.4.5.1	Parámetros a considerar en los lodos.....	57
2.4.5.2	Manejo en la aplicación de lodos en suelos agrícolas.....	58
2.4.5.3	Mineralización de lodos.....	60
2.4.5.4	Propiedades de los lodos: la adsorción.....	63
2.4.5.5	Metales pesados en lodos.....	66
2.4.5.6	Patógenos en lodos.....	69
2.4.5.7	Normativa sobre el uso de lodos en agricultura .	72
2.5	Aspectos generales del maíz.....	79
2.5.1	Taxonomía.....	79
2.5.2	Requerimientos agroecológicos.....	80
2.5.2.1	Latitud.....	81
2.5.2.2	Luz y fotoperiodo.....	81
2.5.2.3	Altitud.....	82
2.5.2.4	Temperatura.....	82
2.5.2.5	Precipitación.....	83

2.5.2.6 Suelos	84
2.5.3 Etapas fenológicas.....	85
2.5.4 Maíz híbrido XB-8010	87

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo y diseño de la investigación.....	89
3.2 Materiales y/o instrumentos.....	89
3.3 Población y muestra	93
3.4 Operacionalización de variables.....	94
3.5 Ejecución de la tesis.....	96
3.5.1 Caracterización físico-química y microbiológica de los lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y de la tierra agrícola.....	96
3.5.2 Estimación y proyección de la generación total de lodos de las PTAR Copare y Magollo.....	100
3.5.3 Evaluación del efecto de los lodos en el crecimiento de plantas de maíz (ensayo).....	102
3.5.4 Revisión bibliográfica	108
3.6 Tratamiento de datos (ensayo).....	108
3.6.1 Diseño experimental	108

3.6.2	Esquema del análisis estadístico	109
3.6.3	Características del campo experimental	110

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1	De la caracterización físico-química y microbiológica de los lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y de la tierra agrícola.....	111
4.1.1	De los parámetros agronómicos	111
4.1.2	De los metales pesados.....	114
4.1.3	De los parámetros microbiológicos	116
4.2	De la estimación y proyección de la generación total de lodos de las PTAR Copare y Magollo	116
4.2.1	En base a la población.....	116
4.2.2	En base al volumen de agua tratada en las PTAR	117
4.2.3	En base a las mediciones de los lodos en los lechos de secado de las PTAR	119
4.3	De la evaluación del efecto de los lodos en el crecimiento de plantas de maíz (ensayo)	120
4.3.1	De la altura de planta.....	120
4.3.2	Del diámetro de tallo	125
4.3.3	Del peso fresco, peso seco y materia seca.....	130

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.1	De la caracterización físico-química y microbiológica de los lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y de la tierra agrícola.....	140
5.1.1	De los parámetros agronómicos	140
5.1.2	De los metales pesados.....	146
5.1.3	De los parámetros microbiológicos	150
5.2	De la estimación y proyección de la generación total de lodos de las PTAR Copare y Magollo	153
5.3	De la evaluación del efecto de los lodos en el crecimiento de plantas de maíz (de la altura de planta, diámetro de tallo y peso fresco, peso seco y materia seca)	158
5.4	De la normativa y contexto nacional e internacional.....	168
5.5	De la factibilidad de aplicar los lodos en agricultura en Tacna ..	192
	CONCLUSIONES	198
	RECOMENDACIONES.....	201
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	203
	ANEXOS	225

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características físico-químicas de lodos según diferentes autores	47
Tabla 2. Contenido máximo de metales pesados en biosólidos aplicados a suelos según la Norma 40 CFR Parte 503 (1993) de la EPA.....	75
Tabla 3. Contenido de patógenos en biosólidos clase A y B según la Norma 40 CFR Parte 503 (1993) de la EPA.....	76
Tabla 4. Valores límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización en agricultura según la Directiva 86/278/CEE de la CEE	79
Tabla 5. Etapas de desarrollo fenológico del maíz	86
Tabla 6. Características del Maíz Híbrido XB-8010	88
Tabla 7. Operacionalización de las variables.....	95
Tabla 8. Parámetros determinados y métodos seguidos en el análisis de caracterización	98
Tabla 9. Parámetros determinados y métodos seguidos en el análisis de metales.....	99
Tabla 10. Parámetros determinados y métodos seguidos en el análisis microbiológico	99

Tabla 11. Tratamientos en estudio.....	103
Tabla 12. Parámetros determinados.....	105
Tabla 13. Esquema del análisis de varianza a utilizarse para la evaluación de los datos del experimento	109
Tabla 14. Análisis de caracterización de la tierra agrícola (INPREX) y de los lodos residuales.....	113
Tabla 15. Contenido de metales pesados (Metales por ICP Masa) de los lodos de Copare, Magollo y de la tierra agrícola (Informe de Ensayo con valor oficial - MA1303520, MA1303522, MA1303523 correspondientemente).....	115
Tabla 16. Análisis microbiológico de las muestras de lodo residual de Copare y Magollo	116
Tabla 17. Estimación y proyección de la generación de lodos en base a la población con servicio de alcantarillado para el período 2012 - 2020.....	117
Tabla 18. Estimación y proyección de la generación de lodos en base al volumen de aguas residuales tratadas para el período 2013 - 2020.....	118
Tabla 19. Generación total de lodos de las PTAR Copare y Magollo (mediciones en enero de 2013).....	119
Tabla 20. Análisis de varianza para el carácter altura de planta de maíz híbrido XB 8010 a los 60 días después de la siembra	120

Tabla 21. Análisis de varianza para el carácter diámetro de tallo de plantas de maíz híbrido XB 8010 a los 60 días después de la siembra.....	125
Tabla 22. Análisis de varianza para el carácter peso fresco de plantas de maíz híbrido XB 8010 a los 60 días después de la siembra.....	130
Tabla 23. Comparación de medias (Duncan, $\alpha = 0.05$) para el parámetro peso fresco de plantas de maíz XB 8010 a los 60 días después de la siembra	131
Tabla 24. Análisis de varianza para el carácter peso seco de plantas de maíz híbrido XB 8010 a los 60 días después de la siembra.....	133
Tabla 25. Comparación de medias (Duncan, $\alpha = 0.05$) para el parámetro peso seco de plantas de maíz XB 8010 a los 60 días después de la siembra	134
Tabla 26. Análisis de varianza para el carácter porcentaje de materia seca de plantas de maíz híbrido XB 8010 a los 60 días después de la siembra	136
Tabla 27. Comparación de medias (Duncan, $\alpha = 0.05$) para el parámetro porcentaje de materia seca de plantas de maíz XB 8010 a los 60 días después de la siembra	137

Tabla 28. Temperaturas promedio registradas en la estación meteorológica “Jorge Basadre” (Enero - Mayo, 2013)	226
Tabla 29. Concentraciones máximas de metales pesados en lodos para aplicación al suelo (mg/kg de sólidos totales en base de materia seca).....	227
Tabla 30. Concentraciones máximas de metales en suelo receptores de lodos (mg/kg de sólidos totales en base de materia seca)	228
Tabla 31. Concentraciones máximas de parásitos y patógenos en lodos (sólidos totales en base de materia seca)	229
Tabla 32. Tratamiento de aguas residuales (% de tratamiento).....	230
Tabla 33. Mediciones y cálculo de la cantidad de los lodos en los lechos de secado de la PTAR Copare	231
Tabla 34. Mediciones y cálculo de la cantidad de los lodos en los lechos de secado de la PTAR Magollo	232
Tabla 35. Promedio de las tres repeticiones para los parámetros altura de planta (cm) y diámetro de tallo de plantas de maíz a los 15, 30, 45 y 60 días después de la siembra	233
Tabla 36. Promedio de las tres repeticiones para los parámetros peso fresco, peso seco y materia seca de plantas de maíz a los 60 días después de la siembra	234

Tabla 37. Tabla de interpretación de análisis de suelo para materia orgánica, fósforo y potasio	240
Tabla 38. Tabla de interpretación de análisis de suelo para pH y salinidad.....	240
Tabla 39. Tabla de interpretación de análisis de suelo para carbonatos y cationes cambiabes	241
Tabla 40. Tabla de interpretación de análisis de suelo para CIC total	241
Tabla 41. Contenidos de niveles óptimos para abonos orgánicos	242
Tabla 42. Proyección de demanda de alcantarillado por localidad 2012 - 2020.....	244
Tabla 43. Distribución de conexiones de alcantarillado	245
Tabla 44. Distribución de conexiones activas de alcantarillado por categoría de usuario	246
Tabla 45. Colectores secundarios existentes.....	246
Tabla 46. Dimensiones de los colectores principales en la ciudad de Tacna	248
Tabla 47. Interceptores existentes	249
Tabla 48. Características físicas de las lagunas existentes en la PTAR Magollo	263
Tabla 49. Análisis bacteriológicos de aguas residuales.....	270

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Efecto de las dosis de lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y de los testigos (tierra agrícola y NPK) en la altura de plantas de maíz híbrido XB 8010 (60 días después de la siembra).....	123
Figura 2. Curva de crecimiento de la altura de plantas de maíz híbrido XB 8010 para las dosis de lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y comparación con los tratamientos testigos (T_1 y T_{10})	124
Figura 3. Efecto de las dosis de lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y de los testigos (tierra agrícola y NPK) en el diámetro de tallo de plantas de maíz híbrido XB 8010 (60 días después de la siembra)	128
Figura 4. Curva de crecimiento del diámetro de tallo de plantas de maíz híbrido XB 8010 para las dosis de lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y comparación con los tratamientos testigos (T_1 y T_{10}).....	129
Figura 5. Efecto de las dosis de lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y de los testigos (tierra agrícola y NPK) en el peso fresco de plantas de maíz híbrido XB 8010 (60 días después de la siembra)	132

Figura 6.	Efecto de las dosis de lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y de los testigos (tierra agrícola y NPK) en el peso seco de plantas de maíz híbrido XB 8010 (60 días después de la siembra)	135
Figura 7.	Efecto de las dosis de lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y de los testigos (tierra agrícola y NPK) en el porcentaje de materia seca de plantas de maíz híbrido XB 8010 (60 días después de la siembra)..	138
Figura 8.	Vista general del ensayo al 09/04/2013	235
Figura 9.	Vista general del ensayo al 10/05/2013	235
Figura 10.	Lodo PTAR Copare: T ₂ (25 t/ha), T ₄ (50 t/ha), T ₆ (75 t/ha) y T ₈ (100 t/ha)	236
Figura 11.	Lodo PTAR Magollo: T ₃ (25 t/ha), T ₅ (50 t/ha), T ₇ (75 t/ha) y T ₉ (100 t/ha)	236
Figura 12.	Testigo T ₁ (0 t/ha, Tierra agrícola), T ₂ (25 t/ha, Lodo Copare), T ₃ (25 t/ha, Lodo Magollo) y Testigo T ₁₀ (NPK, 300-400-200)	237
Figura 13.	Testigo T ₁ (0 t/ha, Tierra agrícola), T ₄ (50 t/ha, Lodo Copare), T ₅ (50 t/ha, Lodo Magollo) y Testigo T ₁₀ (NPK, 300-400-200)	237

Figura 14. Testigo T ₁ (0 t/ha, Tierra agrícola), T ₆ (75 t/ha, Lodo Copare), T ₇ (75 t/ha, Lodo Magollo) y Testigo T ₁₀ (NPK, 300-400-200)	238
Figura 15. Testigo T ₁ (0 t/ha, Tierra agrícola), T ₈ (100 t/ha, Lodo Copare), T ₉ (100 t/ha, Lodo Magollo) y Testigo T ₁₀ (NPK, 300-400-200).....	238
Figura 16. Croquis general del ensayo en el vivero del INPREX – Tacna.....	239
Figura 17. Vista satelital de la PTAR Copare (Cono Sur)	260
Figura 18. Vista satelital de la PTAR Magollo	267

RESUMEN

El propósito de este estudio fue determinar el potencial agrícola de los lodos provenientes de las plantas se determinaron las características físico-químicas y microbiológicas de los lodos, se estimó y proyectó la cantidad generada de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Copare y Magollo en Tacna. Para tal fin,, en base a ratios internacionales y mediciones *in situ* de los lodos en los lechos de secado, y finalmente se efectuó un ensayo con plantas de maíz (*Zea mays* L.) en el que se utilizaron dosis de lodos (provenientes de cada PTAR) de 25, 50, 75 y 100 t/ha, se tuvieron adicionalmente tratamientos testigos, con fertilizante comercial (T₁₀) y un control con tierra agrícola sola (T₁). Al cabo de 60 días, no se encontraron diferencias significativas en el ensayo para los parámetros de altura y diámetro de tallo, contrario a los parámetros de biomasa; sin embargo, los resultados no obedecieron una tendencia acorde a las dosis de lodos. Acorde a la caracterización de los lodos y basándonos en la normativa de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos, el lodo de Copare sobrepasa los límites de arsénico y el de Magollo ninguno, además corresponden a la Clase B y A respectivamente por su contenido de patógenos.

Palabras clave: Lodos residuales, aprovechamiento agrícola, metales pesados, patógenos.

ABSTRACT

The purpose of this study was to determine the agricultural potential of the sewage sludge from Copare and Magollo wastewater treatment plants in Tacna. To this end, physico-chemical and microbiological characteristics of the sewage sludge were determined, estimated and projected the amount generated, based on international ratios and *in situ* measurements of the sewage sludge drying beds, and finally a test was carried out with corn plants (*Zea mays* L.) with doses of sewage sludge (from each wastewater treatment plant) of 25, 50, 75 and 100 t/ha, additionally were used control treatments, with commercial fertilizer (T₁₀) and a control with only agricultural land (T₁). After 60 days, no significant differences in test parameters for height and stem diameter were found, opposite to the biomass parameters, however the results did not obey a trend according to the sludge dose. According to the characterization of sewage sludge and based on the regulations of the U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Copare's sewage sludge beyond the limits of arsenic, and none the Magollo's sewage sludge, also are Class B and A respectively for their pathogen content.

Keywords: Sewage sludge, agricultural use, heavy metals, pathogens.

INTRODUCCIÓN

Actualmente a nivel mundial se encuentran en desarrollo políticas ambientales que tienen por objetivo controlar los procesos productivos que causan impactos sobre el ambiente. En el marco de la política de preservación de la calidad del agua, se han construido plantas de tratamiento de aguas residuales, las cuales generan un subproducto inevitable llamado lodo residual o de depuradora, biosólidos, barros o fangos (Leppe, López y Nelson, 2002; Hernández, 2004; Ramírez, Velásquez y Acosta, 2007); el incremento en el tratamiento de las aguas residuales ha generado, como consecuencia, un aumento en las cantidades de lodo producido, creando la necesidad de manejar adecuadamente este subproducto para reducir los riesgos ambientales asociados a su composición, y conforme las normas indiquen una calidad mayor en el efluente, mayor será la producción de lodos residuales (Hernández, 2004), así mismo mientras mayor es la carga orgánica que entra en el sistema de tratamiento y más eficiente este, mayor es la producción de lodos (Terry, Gutiérrez y Abó, 2010). Estos lodos son materiales orgánicos ricos en nutrientes como el N, P y K, contienen también trazas de metales pesados y microorganismos patógenos (Leppe

et al., 2002; Jurado, Luna y Barretero, 2004; Utria *et al.*, 2008). Este contenido puede ser aprovechado a nivel agrícola, siendo una alternativa ecológica y económica para su disposición. El interés en la aplicación de los lodos al suelo ha aumentado como consecuencia de la menor disponibilidad y viabilidad de otras opciones de gestión de los lodos, tales como el transporte a vertederos controlados, la incineración y la evacuación en el mar (Rechcigl, 1995, citado por Giraldo y Lozano De Yunda, 2006).

Por su parte, en el Perú, el tratamiento de las aguas se está expandiendo, esto se puede ver reflejado en que en el año 1996 la cobertura de tratamiento de aguas residuales a nivel nacional era de 11,1 %, mientras que en el 2011 la cobertura fue de 32,7 % (Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento [SUNASS], 2012), además, el Plan Nacional de Saneamiento 2006-2015, establece como meta para el año 2015, una cobertura objetivo de 100 % de tratamiento de aguas residuales tanto para el ámbito urbano como rural (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2006), por lo cual se prevé un drástico incremento de la producción nacional de lodo. Sin embargo, hoy en día, en el país no se cuenta con una norma técnica que determine la aplicabilidad de estos residuos, que están clasificados como residuos peligrosos según el DS N° 057-2004-PCM (Reglamento de la Ley N°

27314 - Ley General de Residuos Sólidos) determinándose su disposición final en un relleno sanitario; aunque, existe una norma técnica (Norma OS.090, sobre plantas de tratamiento de aguas residuales) que establece su aplicabilidad como acondicionador de suelos por el contenido de nutrientes que posee, no obstante esta norma no es específica sobre el uso de lodos y denota ambigüedad y falta de información en este aspecto.

Por otra parte, la sociedad tiene como principio la obligatoriedad de hacer un uso más completo de los recursos de los cuales dispone y, al mismo tiempo, proteger el entorno en que vive (Ahtesaari, 2006, citado por Negrín y Jiménez, 2012). Potencialmente, la opción más atractiva sería esparcir los lodos en terrenos agrícolas, porque se podrían reciclar nutrientes y ser útiles desde el punto de vista agronómico (Hernández, 2010), de esta manera se obtiene un doble beneficio: el ambiental, al eliminarse los residuos orgánicos urbanos sin alteración relevante del equilibrio ecológico; y el agrícola, al incorporar a los suelos de cultivo la materia orgánica y los nutrientes contenidos en estos desechos (Aller, Otero, Garzón y Morán, 1999). Es por ello que según Negrín y Jiménez (2012) en el sector agropecuario se debe potenciar los ciclos cerrados de producción cuando se dispone de plantas de tratamiento de aguas residuales, ya que a partir del uso de los lodos se puede obtener una fuente de abono para la agricultura local.

Además, en los últimos años la ciudad de Tacna ha crecido aceleradamente, tanto en infraestructura como en su población; por lo tanto, la demanda de servicios de agua y saneamiento también se ha incrementado. En el año 2007, Tacna tenía una población de 288 781; y en el último periodo censal (1993-2007), el crecimiento poblacional de la región fue de 2 % (promedio anual) (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2007). Y frente a la situación de poca disponibilidad de agua para la agricultura y debido a una creciente demanda competitiva entre el consumo humano y el riego agrícola, se construyeron dos plantas de tratamiento de agua residual (PTAR Copare y PTAR Magollo), que le permitiera optimizar el desarrollo agrícola mediante el uso de las aguas servidas que producía la ciudad (Del Carpio, 2001), trayendo esto como problema la alta generación de lodos en las PTAR; haciéndose entonces prioritario el avance en el conocimiento de opciones que permitan disponer o utilizar este material en grandes cantidades con viabilidad económica, técnica y ambiental.

En este contexto, con el presente trabajo de investigación se pretendió analizar: los parámetros agronómicos y sanitarios que determinan la aplicabilidad de los lodos en el suelo y la agricultura, su generación en las PTAR con el fin de evaluar su producción en el tiempo, su efecto en el crecimiento inicial de maíz, la normativa nacional e

internacional que engloba su aplicación, para finalmente determinar el potencial agrícola de los lodos provenientes de las PTAR Copare y Magollo, y de esta manera generar mayor interés en este recurso, ya que actualmente los lodos son considerados como un residuo, pero que gestionados de la manera adecuada pueden adquirir importancia local, regional y nacional.

En el Capítulo I, se presenta el Planteamiento del problema, donde se describe y formula el mismo, se detalla la justificación e importancia del trabajo, así también se indican los alcances y limitaciones, objetivos e hipótesis.

En el Capítulo II, se presenta el Marco teórico, donde se muestran los antecedentes, definiciones y otros aspectos conceptuales sobre los lodos, aguas residuales y el maíz.

En el Capítulo III, se describe el Marco metodológico, donde se definen aspectos como el diseño de la investigación, población y muestra y tratamiento de datos; así también se indican los materiales e instrumentos utilizados y el procedimiento seguido para la ejecución de la tesis.

En el Capítulo IV, se describe e interpretan los resultados de la caracterización y generación de lodos y su efecto en plantas de maíz.

En el Capítulo V, se presenta la discusión de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

1.1.1 Antecedentes del problema

Diferentes estudios han probado los beneficios de la aplicación de lodos en tierras de cultivo como fertilizante por su alto contenido de nutrientes y materia orgánica, que mejoran las condiciones fisicoquímicas del suelo (Acosta, Ramírez y Gutiérrez, 1996; Acevedo, 2004; Miranda y Reyes, 2005; Henríquez, 2011). Sin embargo, la utilización de estos sin precaución puede ocasionar problemas a la salud humana y al ambiente. Los lodos residuales están compuestos de altas concentraciones de bacterias, virus y parásitos (Carrington, 2001; United States Environmental Protection Agency [USEPA] 2003); además de compuestos orgánicos (Abad *et al.*, 2005; Mantis, Voutsas y Samara, 2005) y metales pesados (Bautista, 1999; Miranda y Reyes, 2005).

Cuando los lodos tienen el potencial de ser utilizados para alguna actividad productiva, se les puede considerar entonces como biosólidos. El uso de los biosólidos en actividades productivas depende directamente de su calidad en términos de ciertos contaminantes (Fayett, 2008).

Los lodos sin tratar o parcialmente tratados solo deben aplicarse en zanjas cubiertas antes de la temporada de cultivo o deben inyectarse al subsuelo. En cambio, los lodos totalmente tratados (digeridos y sin agentes patógenos) pueden aplicarse en el terreno sin riesgo para la salud (León, 1995).

Acevedo (2004), en su trabajo “Valorización de lodos provenientes de tratamiento de aguas servidas como mejorador de suelos degradados”, concluye que las aplicaciones de lodo, que estuvieron en o sobre el límite máximo de aplicación fijado por el CONAMA (Chile), aumentaron la materia orgánica del suelo en el corto plazo, lo que tuvo efectos en algunas propiedades físicas y químicas de los suelos, relevantes para el mejoramiento de su calidad (estabilidad de agregados, retención de agua, CIC, niveles N

y P, disminuyó el pH de los suelos), sin embargo también existieron aspectos poco favorables por la aplicación de lodos en los suelos, y fueron los siguientes:

- Aumento de la salinidad del suelo en todas las localidades, lo que no tendría mayor importancia si se dispone de agua de riego de buena calidad.
- Los metales pesados en general aumentaron con la dosis de lodo, sin embargo, solo el zinc sobrepasó los niveles de la norma establecida por el CONAMA.
- La alta variación de los valores entre temporadas para un mismo predio sugiere que se realicen ensayos con períodos más largos de tiempo.

Hernández *et al.* (2005) concluyen en su trabajo sobre aplicaciones de lodos residuales, estiércol y fertilizantes en el cultivo de sorgo, que la adición de abonos orgánicos o químicos no influyó apreciablemente en el contenido de metales pesados en la parte aérea y en la raíz de cultivo, además indica que en ciudades en las que las aguas residuales no provienen de la industria tienen en los lodos un

insumo de uso agrícola, pero que la aplicación continua de estos biosólidos en el suelo podría ser perjudicial.

1.1.2 Problemática de la investigación

Las políticas de saneamiento de las aguas servidas han traído como consecuencia, un alto impacto sobre el desarrollo de tecnologías de tratamiento de las aguas servidas como también beneficios por la reducción de la contaminación de recursos hídricos continentales. No obstante, con estos avances, se han generado elevados volúmenes de lodos recuperados (Castro, 2007, citado por Henríquez, 2011).

Actualmente en Perú se da poca o casi nula importancia acerca del tema de lodos, del uso benéfico al suelo y mucho menos del uso de estos en la agricultura. Y con esto poniéndonos en desventaja frente a otros países que ya hace varios años tienen normativa respecto al tema y al uso más adecuado de los lodos. Gran parte de los lodos son dispuestos en los rellenos sanitarios, en el área de material orgánico, este accionar hace que este recurso disminuya la vida útil de los

rellenos al ocupar un gran espacio, así mismo una vez dispuestos allí generan gas metano, gas de efecto invernadero.

El manejo y uso de los lodos, especialmente en los suelos exige una serie de consideraciones sanitarias, de restricciones, requisitos y de condiciones técnicas, las que deben ser indicadas en la normativa, sin embargo, surgen interrogantes en cuanto a la tasa de aplicación de lodos, contenido de patógenos y metales pesados, los suelos y su variabilidad espacial entre otros aspectos.

Si bien, los lodos tienen un alto contenido de materia orgánica que favorecen las propiedades físicas intrínsecas del suelo, y mejoran la productividad, también aportan otros compuestos, tales como elementos traza metálicos (ETM) y altas cargas de microorganismos patógenos (Alloway, 1995, Epstein, 2003, citados por Henríquez, 2011), los que limitan su uso. Las normativas extranjeras generalmente permiten una aplicación directa de los lodos al suelo, los que han sido utilizados durante décadas, pero se reconocen las restricciones señaladas anteriormente.

En este sentido, en el Perú, como norma más relacionada al tema, se tiene a la Norma OS.090 sobre Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, aprobada en el año 2006, donde se considera el tratamiento de lodos, que permite un manejo y destino final de los mismos, entre estos, su aplicación en suelos agrícolas, sin embargo, lo anterior podría generar conflictos y trabas en el contexto del modelo agroexportador peruano (puesto que podría incidir en la calidad de los productos), dadas las restricciones de exportación para ciertos productos con algunos países, además de que se requeriría de un reglamento específico para la aplicación de lodos en agricultura.

En el presente trabajo se pretendió abordar la temática de la aplicación de lodos a través de un enfoque de sistema. Según Bifanni (2007), un sistema físico natural, está constituido por dos subsistemas: un subsistema urbano-periurbano, en el cual se generan los lodos como parte del servicio de tratamiento de las aguas servidas y el otro subsistema rural o agrosistema, en el cual se pueden disponer los lodos. La

opción de destino en suelos agrícolas, considera las propiedades químicas del lodo, y sus posibilidades de mejoramiento de algunos tipos de suelos como una alternativa integrada de gestión.

Si bien varias investigaciones sobre la aplicación de lodos municipales en agricultura han obtenido resultados prometedores, se pretende analizar las características específicas de los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Tacna (dada su variabilidad espacial y temporal) y su potencial uso en la agricultura local. Este agrosistema se ha seleccionado y acotado por sus condiciones agrícolas, ya que es una alternativa de disposición de lodos, dada la creciente producción de lodos en las PTAR, la presencia de componentes en los lodos que restringen su aplicación y las dificultades en su manejo y aplicación.

1.2 Formulación del problema

¿Los lodos provenientes de las PTAR de Copare y Magollo reúnen las condiciones agronómicas y sanitarias para su aplicación en la agricultura?

De la pregunta central, se disgregan las siguientes interrogantes:

- ¿Las características físico-químicas y microbiológicas de los lodos generados en las PTAR Copare y Magollo están dentro de los rangos permitidos establecidos por las normas oficiales?
- ¿Las PTAR Copare y Magollo generan un volumen continuo de lodos que hace posible considerarlo un potencial recurso?
- ¿La aplicación de los lodos de las PTAR Copare y Magollo como abono incrementa el crecimiento de plantas?

1.3 Justificación e importancia

En la actualidad la fertilización está basada en productos inorgánicos. Estos tienen la ventaja fundamental de que con su empleo, se obtienen efectivamente mayores producciones; pero presentan directamente un inconveniente claro: su aporte nulo de materia orgánica.

Este hecho, unido a las prácticas de cultivo en muchas zonas (laboreo excesivo, cultivos en pendiente), provoca una progresiva pérdida de materia orgánica de los suelos, con todas las consecuencias que ello acarrea: una disminución de la fertilidad y de la capa útil de suelo, reducción de la capacidad de retención de nutrientes, erosión, etc., en un proceso que en algunas zonas se está tornando como irreversible, con las graves consecuencias ambientales que esto presenta a medio y largo plazo, hipotecando su viabilidad futura.

Ahora la utilización de los lodos proveniente de las PTAR en la aplicación benéfica al suelo especialmente en la agricultura, ha demostrado ser en los últimos tiempos una alternativa interesante a la hora de decidir una forma de utilización de dichos lodos.

La principal ventaja deriva de los efectos beneficiosos que se ha observado en cuanto a la mejora de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y así se reduce el empleo de fertilizantes y plaguicidas sintéticos. Pero, sin embargo, también suscita preocupaciones en lo que respecta a la contaminación de los alimentos con metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos.

Actualmente en Tacna, en las PTAR Copare y Magollo, se genera una carga potencial de lodos residuales, constituyendo una creciente preocupación su disposición final, así como los costos económicos y ambientales debido a sus componentes tóxicos como es el contenido de metales pesados que podrían contener y de los cuales no se tiene registro a la actualidad.

1.4 Alcances y limitaciones

- Los resultados de los análisis de caracterización de los lodos, son válidos para las muestras correspondientes a la fecha del trabajo, debido a su alta variabilidad y a un manejo no adecuado de los lodos, análisis posteriores podrían diferir de los actuales.
- Los lodos utilizados en el presente trabajo se extrajeron de los lechos de secado de cada PTAR, correspondiendo ambos a lodos deshidratados por un período de aproximadamente 8 meses.
- Actualmente en la región Tacna, no se tienen experiencias documentadas sobre la aplicación de lodos residuales en cultivos, es más, en el país, existe poca bibliografía sobre este tema. Sin embargo, con las experiencias de otros países como de Chile, México y España, en las que muchas obtienen conclusiones similares, se puede fundamentar y contrarrestar los resultados obtenidos.

- El tratamiento de aguas residuales en las PTAR de Tacna no es el óptimo, además de que las aguas de la región debido a la particular geodinámica ya contienen algunos metales pesados, esto repercutiría en la calidad de los lodos.
- La EPS Tacna S.A., no lleva registro sobre la generación de lodos en las PTAR Copare y Magollo, lo cual dificulta el cálculo de su producción, y es indicador de una no adecuada gestión de los mismos.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Determinar el potencial agrícola que tienen los lodos provenientes de las PTAR Copare y Magollo, Tacna.

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar las características físico-químicas y microbiológicas de los lodos generados en las PTAR Copare y Magollo.
- Estimar y proyectar la generación total de lodos de las PTAR Copare y Magollo.

- Determinar el efecto de la aplicación de los lodos de las PTAR Copare y Magollo como abono en el crecimiento de plantas de maíz (*Zea mays*).

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis general

Los lodos provenientes de las PTAR Copare y Magollo, reúnen las condiciones agronómicas y sanitarias para su aplicación en la agricultura.

1.6.2 Hipótesis específicas

- Los lodos generados en las PTAR Copare y Magollo son aptos para la aplicación en la agricultura, debido a que las concentraciones de metales pesados y patógenos están dentro de los rangos permitidos establecidos por las normas oficiales.
- Las PTAR Copare y Magollo generan un volumen continuo de lodos que hace posible considerarlo un potencial recurso.
- La aplicación como abono de los lodos de las PTAR Copare y Magollo incrementa el crecimiento de plantas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes generales

2.1.1 Materia orgánica

Se podría definir como los restos de vegetales y animales de cualquier naturaleza que han completado su evolución o interrumpido a fin de incorporarlo al suelo. También es definida como fracción orgánica del suelo que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo y sustancias producidas por los habitantes del suelo (Arca, 1970; Labrador, 2001; Jordán, 2005). La materia orgánica representa una pequeña fracción de la masa de la mayor parte de los suelos, en general entre 1 y 6 % del horizonte A y decrece en profundidad (Ghisolfi, 2011; Thompson y Troeh, 2002).

La materia orgánica se puede clasificar en biótica y abiótica (Skjemstad *et al.*, 1998, citados por Labrador, 2001). La materia orgánica biótica está constituida por organismos vivos presentes en el suelo (microfauna y microorganismos como bacterias, hongos y actinomicetos) (Acevedo, 2004). Aunque la biomasa edáfica pueda representar una fracción relativamente pequeña del total de la biomasa en los ecosistemas terrestres, del 1 al 5 % de la fracción orgánica de suelo, la actividad de la misma es de la máxima importancia para la biodegradación, la mineralización y la inmovilización de los constituyentes orgánicos. La materia orgánica abiótica o “no viva” corresponde a la mayor parte de la materia orgánica (más del 95 % de la misma) y está constituida por una parte más lábil y disponible como fuente energética y nutriente formada por restos de animales, plantas y microorganismos transformados de forma incompleta (materia orgánica lábil o fresca), y una parte denominada “materia orgánica transformada” de naturaleza polimérica, compleja y más estable en el tiempo que incluiría dos subgrupos: a) sustancias no húmicas y b) sustancias húmicas (Labrador, 2001). Las sustancias húmicas del suelo corresponden a

sustancias orgánicas difícilmente clasificables, que varían de estables a muy estables (Acevedo, 2004). Estas son de color oscuro, amorfas, coloidales, muy resistente al ataque microbiano, con propiedades coloidales e hidrofílicas y presentan alta capacidad de intercambio iónico (Labrador, 2001); representan entre el 60 y 90 % de la materia orgánica total del suelo (Acevedo, 2004), sin embargo este porcentaje es variable ya que depende de muchos factores externos e internos (Schnitzer, 1991, citado por Labrador, 2001).

El humus se encuentra en el suelo de distintas formas, entre ellas están el ácido fúlvico, ácido himatomelánico, ácido húmico y humina (Fassbender y Bornemisza, 1994; Labrador, 2001). Los ácidos fúlvicos forman complejos estables con cationes polivalentes (Fe^{+++} , Al^{+++} , Cu^{++} y otros), lo que permite disminuir la fijación de fosfatos por parte de éstos y por los sesquióxidos de aluminio o de hierro. Los ácidos himatomelánicos son una mezcla compleja de compuestos húmicos y de ácido húmico (Acevedo, 2004).

2.1.1.1 Efectos de la materia orgánica en los suelos

La materia orgánica del suelo preferente humificada es un constituyente esencial del sistema edáfico ya que por su constitución y propiedades tiene influencia sobre las propiedades que definen la fertilidad global de suelos agrícolas y por ende el óptimo desarrollo de los cultivos. Es la responsable directa de la mayoría de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Labrador, 1996, Aguilera y Rodríguez, 2005, citados por Henríquez, 2011).

La aplicación de materia orgánica humificada aporta nutrientes y funciona como base para la formación de múltiples compuestos que mantienen la actividad microbiana como son las sustancias húmicas (ácidos húmicos, fúlvicos y huminas) (Tisdale y Nelson, 1966, Bellapart, 1996, citados por Félix, Sañudo, Rojo, Martínez y Olalde 2008). Dentro de los beneficios en el suelo, la materia orgánica ayuda a la formación y estabilización de los agregados, al

desarrollo de raíces, estimula la adsorción e intercambio catiónico, incrementa el poder tampón del suelo, reduce la acción de sustancias tóxicas, mejora la capacidad de retención de humedad y mejora la porosidad y aireación facilitando el laboreo (Honorato, 2000; Julca, Meneses, Blas y Bello, 2006).

En general, la fracción orgánica del suelo tiene un papel importante: regula los procesos químicos que allí ocurren, influye sobre las características físicas y es el centro de aproximadamente todas las actividades biológicas en el mismo, incluyendo las de la microflora, las de la fauna y hasta las del sistema de raíces de plantas superiores (Fassbender y Bornemisza, 1994). Cabe mencionar que prácticamente la totalidad del nitrógeno aportado por el suelo a un cultivo proviene de la descomposición de la materia orgánica por lo que, en general, a mayor contenido de materia orgánica en el suelo hay mayor disponibilidad de nitrógeno (Acevedo, 2004).

Sin embargo, el papel de la materia orgánica en la complejidad del suelo es mucho más importante, que sólo su aporte de nutrientes al suelo y, por ello, insustituible (Labrador, 2001).

2.1.1.2 Efectos de la materia orgánica en las plantas

La materia orgánica, dentro de ciertos límites, puede favorecer directamente el crecimiento de los vegetales, produciendo un incremento adicional cuando los factores de crecimiento se alejan del óptimo deseable (Honorato, 2000). La importancia del humus en el desarrollo de las plantas se debe principalmente a su elevada capacidad amortiguadora frente a cambios de pH, tiende a estabilizar la estructura del suelo, retiene una gran cantidad de agua y tiene una elevada capacidad de intercambio catiónico (Acevedo, 2004). Al respecto Honorato (2000) menciona que la acción directa de las sustancias húmicas podría deberse a la estimulación del metabolismo vegetal, mejora en los procesos energéticos, efecto hormonal, y el aumento

de la permeabilidad de la membrana plasmática de las células de la raíz, que se traduce en mayor absorción de sales de la solución del suelo.

Abad (1993) citado por Julca *et al.* (2006) señala que los ácidos húmicos y fúlvicos tienen un efecto positivo sobre muchas funciones de la planta, a nivel de células y órganos; por su parte Kanonova (1970) citado por Julca *et al.* (2006) señala el efecto estimulante de los ácidos húmicos y los fulvoácidos en la formación de raíces al alterar la diferenciación del punto de crecimiento. El mismo autor, indica que también se ha evaluado el efecto de la materia orgánica o de productos derivados de ésta, sobre el crecimiento de la planta o la producción de cultivos, encontrándose aumentos en cada uno de estos parámetros.

2.1.2 Fertilización orgánica

La fertilización orgánica es un método donde se realiza aportes de minerales complementarios al suelo bajo la forma de compuestos naturales (Suquilanda, 1996, citado por

Vargas, 2007). La fertilización orgánica se fundamenta en el aprovechamiento de la biomasa de las plantas, residuos vegetales post-cosecha, excrementos animales, lodos residuales, desechos industriales, agroindustriales y urbanos. Con esta práctica de fertilización se reciclan componentes nutricionales de estos desechos y se mejora la calidad física y biológica del suelo. La dinámica de los procesos de descomposición de los materiales orgánicos, su acción residual y aporte en la nutrición de las plantas y propiedades del suelo, depende de un conjunto de variables como la naturaleza de los productos, características del suelo, las poblaciones de organismos y su actividad, y las características climáticas; el seguimiento de los mismos es complejo y difícil de caracterizar por su dinámica, diversidad e interrelaciones de los factores y procesos que intervienen (Matheus, Caracas, Montilla y Fernández, 2007).

2.2 Reseña histórica del tratamiento de aguas y lodos residuales

Los residuos generados por las primeras poblaciones humanas eran fácilmente reciclados por la naturaleza sin riesgos importantes de contaminación, pero a medida que se fue incrementando la

población, los residuos generados se convirtieron en un problema para la sociedad. En culturas milenarias como la de China, los residuos orgánicos se utilizaron aplicándolos a suelos agrícolas, de esta forma se evitaba la contaminación y se mejoraba la fertilidad de los suelos (Hernández, 2004).

Fue en 1665, cuando una gran plaga (peste negra) mató a más de 60 mil londinenses. Todo parte cuando a fines del siglo XVI el rey Henrique VIII decretó que cada habitante de Londres, debía limpiar su propia alcantarilla. Estos estándares de higiene se mantuvieron y llevaron a que las aguas se contaminaran y mucha gente contrajera enfermedades como cólera, fiebre tifoidea y hepatitis. Esta situación empeoró con los siglos, ya que no se realizó ningún cambio en el sistema, y fue la llegada de la revolución industrial lo que desencadenó un cambio. La masiva llegada de trabajadores desde las granjas a la ciudad a mediados de 1800, generó un aumento en la densidad de la población con los consiguientes problemas de higiene que esto traía: los gases liberados en las alcantarillas eran explosivos y en caso de lugares cerrados mataba a las personas mientras dormían, es así que los alcantarillados colapsaron, había

malos olores y desechos por las calles, la gente bebía agua del río sin ser tratada (Rámila y Rojas, 2008).

La solución a estos problemas vino con diluir los excrementos en agua y tirarlos en un sistema de alcantarillado central, los cuales posteriormente serían lanzados al río con la marea alta. Esto funcionó hasta que se empezó a criticar este sistema de “dilución” como solución para la contaminación a principios del siglo XX, ya que los ríos y lagos no daban abasto para la cantidad de aguas servidas que se vertían en ellos. Fue en 1924 cuando la ciudad de Nueva York empezó a bombear estos residuos al mar a 12 millas de la bahía; sesenta años después la EPA (Environmental Protection Agency o Agencia de Protección Ambiental) de Estados Unidos determinó que las aguas habían sido seriamente dañadas y por lo tanto las aguas servidas deberían ser vertidas a 106 millas de distancia, pero no fue hasta el año 1980, en donde se veían jeringas y agujas de hospitales flotando en las playas, situación de la que se tomó seriedad; y en 1988 el Congreso de Estados Unidos prohibió lanzar aguas servidas al mar (Rámila y Rojas, 2008).

Aunque la captación y drenaje de aguas pluviales datan de tiempos antiguos, la recogida de aguas residuales no aparece hasta principios del siglo XIX, mientras que el tratamiento sistemático de las aguas residuales data de finales del siglo pasado y principios del presente. El desarrollo de la teoría del germen a cargo de Koch y Pasteur en la segunda mitad del siglo XIX marcó el inicio de una nueva era en el campo del saneamiento. Hasta ese momento se había profundizado poco en la relación entre contaminación y enfermedades, y no se había aplicado al tratamiento de aguas residuales la bacteriología, disciplina entonces en sus inicios (Metcalf y Eddy, 1995),

Hasta 1940 los lodos residuales generados en las plantas más evolucionadas de tratamiento de aguas residuales, se aplicaban a suelos agrícolas, sin embargo, su uso disminuyó debido a la aparición de los fertilizantes químicos, los cuales eran de bajo costo, fácil aplicación y contenido nutrimental constante. En las últimas décadas, la aplicación de lodos residuales a suelos agrícolas está siendo considerada como uno de los métodos de disposición más atractivos, debido a su costo relativamente bajo y al efecto positivo sobre el rendimiento de los cultivos (Hernández, 2004). En 1992 se

registró el nombre de “biosólidos”, para reemplazarlo por el de “lodos de aguas servidas” (sewage sludge en inglés), como una campaña para cambiar la imagen que tenía de desecho por la imagen de un producto que podía ser reutilizado benéficamente para otros usos, como el forestal y el agrícola (Rámila y Rojas, 2008).

2.3 Aguas residuales

Metcalf y Eddy (1995), desde el punto de vista de las fuentes de generación, define el agua residual como la combinación de los residuos líquidos, o aguas portadoras de residuos, procedentes tanto de residencias como de instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales, a los que pueden agregarse, eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales

2.3.1 Características de las aguas residuales

Los constituyentes encontrados en las aguas residuales pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos (García, 2012; Martín *et al.*, 2006). Según Terry *et al.* (2010) dentro de las características físicas de las aguas residuales se considera a la conductividad eléctrica específica, color, pH, turbiedad, sólidos totales, sólidos sedimentables, temperatura,

olor y densidad; en las características químicas considera la acidez, alcalinidad, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), concentración de fósforo y nitrógeno, grasas y gases; y en las características biológicas considera las bacterias, hongos, algas, plantas y animales macroscópicos, virus, protozoos, dentro de los cuales destaca a los organismos patógenos (bacterias, hongos, virus, helmintos, protozoos) y los indicadores de contaminación (coliformes totales, coliformes fecales, *E. coli*, *Streptococos fecales*).

2.3.2 Proceso de depuración de las aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales se define como el conjunto de operaciones físicas y procesos químicos y biológicos a que se someten las mismas para la eliminación de contaminantes seleccionados y el cumplimiento de parámetros de vertimiento o reúso, evitando afectar patrones higiénicos, ambientales, estéticos, económicos y sociales (Metcalf y Eddy, 1995).

Según Alcañiz, Ortiz y Carabassa (2008), este proceso consiste básicamente en la eliminación de la materia orgánica

y otras partículas en suspensión que llevan las aguas residuales. Se suele hablar de dos líneas diferenciadas de tratamiento: la línea de agua y la línea de fangos:

Línea de agua

La tipología del agua residual puede ser según su origen doméstica, industrial o, lo que es más frecuente, una mezcla de las dos anteriores en diferentes proporciones. En cualquier caso, las etapas más frecuentes por las que debe pasar el agua residual durante su proceso de depuración son las siguientes:

- a) Pre-tratamiento: se eliminan los sólidos voluminosos, las arenas y gravas, y parte de las grasas mediante tratamientos físicos como lo son el tamizado, precipitación física forzada, separación con inyección de aire, etc.
- b) Decantación primaria: se realiza, generalmente, en balsas circulares (decantadores primarios) de fondo cónico, donde una parte de la materia orgánica e inorgánica que lleva en suspensión el agua residual se deposita en el fondo por el efecto de la gravedad. Las depuradoras

biológicas pueden incluir esta etapa, o no, en función del grado de contaminación del agua. el fango obtenido en esta etapa se denomina lodo primario.

- c) Depuración biológica: el agua llega desde el pre-tratamiento o desde el decantador primario a un reactor donde la materia orgánica contenida en las aguas residuales se digiere mediante la actividad biológica de los microorganismos presentes. Esta actividad se optimiza con la incorporación de aire, de manera que se produce un rápido crecimiento microbiano alimentado por esta materia orgánica y, en consecuencia, disminuye considerablemente su concentración. Esto da lugar a grandes flóculos de material en suspensión que se separan en la decantación secundaria. Dentro de este proceso también se puede conseguir la reducción de los compuestos de nitrógeno, fósforo y otros nutrientes presentes en el agua residual.
- d) Decantación secundaria: es un proceso muy similar a la decantación primaria, donde se produce la separación del agua depurada de los lodos biológicos. El producto que se obtiene se denomina lodo biológico o fango secundario.

e) Tratamiento terciario: es el tratamiento más avanzado de depuración de las aguas residuales. El objetivo de este tratamiento es garantizar la desinfección del agua, consiguiendo una calidad superior a la de los tratamientos convencionales, que la haga apto para su reutilización para usos que no requieren una calidad de agua potable.

Línea de fangos

En función del diseño de la línea de agua los lodos generados pueden ser primarios, secundarios o mixtos. En la línea de fangos, estos son sometidos a una serie de tratamientos destinados principalmente a reducir y estabilizar la materia orgánica, disminuyendo así su degradabilidad y consecuentemente el mal olor y reducir el volumen mediante la eliminación de parte del agua que contienen, con el objetivo de obtener un residuo de mejor calidad y de más fácil manejo.

a) Recirculación: una parte de los fangos del decantador secundario son devueltos al reactor biológico para asegurar la actividad biodegradativa de los microorganismos.

- b) **Espesamiento:** el exceso de materia decantada se purga desde los decantadores y se bombea hasta unos espesantes donde, mediante la acción física de la gravedad o bien por flotación, se homogeneizan y se concentran para reducir su volumen y poder tratarlos posteriormente con más eficacia. Este tratamiento permite obtener lodos con una concentración en torno al 5% de materia seca.
- c) **Digestión:** los lodos espesados son conducidos a un reactor para estabilizarlos, reduciendo su parte biodegradable. Este es un proceso que se realiza aprovechando la actividad biológica de los mismos microorganismos presentes en los lodos. Puede ser de tipo aeróbico o anaeróbico, según se desarrolle en presencia o no de oxígeno, y mesófilo o termófilo, dependiendo de la temperatura en la que se desarrolla el proceso.
- d) **Deshidratación:** permite reducir el contenido de agua del fango minimizando así la cantidad de residuo generado en la depuradora y mejorando muy significativamente las condiciones de manejo. Las deshidrataciones actuales

son casi en su totalidad de tipo mecánico y las sequedades del fango que se obtienen oscilan entre el 15 y el 35 % de materia seca.

En la actualidad, con el desarrollo tecnológico alcanzado y la aparición de decenas de miles de compuestos químicos que se incorporan a las corrientes de aguas residuales, la mayoría de ellos tóxicos, el diseño de los sistemas de tratamiento se basa en criterios múltiples que contemplan la eliminación de contaminantes tan disímiles como materia orgánica, grasas y aceites, microorganismos patógenos, sólidos suspendidos, sustancias tóxicas y nutrientes contenidos en las aguas residuales, de acuerdo con cada situación específica (Terry *et al.*, 2010). García (2012) indica que de los constituyentes del agua residual, los sólidos suspendidos, los compuestos orgánicos biodegradables y los organismos patógenos son de mayor importancia, y por ello la mayoría de instalaciones de manejo de aguas residuales deben ser diseñadas para su remoción.

2.4 Lodos residuales

Los biosólidos (históricamente conocidos como lodos residuales o de depuradora) son materiales sólidos orgánicos producidos en procesos de tratamiento de aguas servidas de origen privado o comunitario que pueden ser usados beneficiosamente, especialmente como enmienda de suelos (United States Environmental Protection Agency [USEPA], 1999). Los lodos de depuradora, constituyen un material semisólido, heterogéneo, cuya composición es muy variable y está determinada por las características del agua residual a tratar, por los procesos de depuración empleados y por el tratamiento a que es sometido el lodo (Moreno y Moral, 2008), además se atribuye estas diferencias al clima, forma y uso del terreno, distribución de la población, problemas de calidad del agua y del estatus económico de la ciudad (Naidu, *et al.*, 2004, citados por Henríquez, 2011). La normativa de Estados Unidos, referida a los lodos residuales (40 CFR Part 503), los define como: “Sólido, semisólido, o líquido residual generado durante el tratamiento de residuos domésticos, en una planta de tratamiento. Los lodos residuales incluyen, pero no están limitados, a espuma o sólidos removidos en procesos de tratamiento primario, secundario o avanzado de agua residual; y material derivado de lodos residuales. El lodo residual no incluye las cenizas generadas

durante la incineración de los mismos o gravas y piedras generados durante el tratamiento preliminar de residuos domésticos en plantas de tratamiento municipales” (United States Environmental Protection Agency [USEPA], 1993).

2.4.1 Producción de lodos

La USEPA (1999), estima que en Estados Unidos, aproximadamente 6,9 millones de toneladas de biosólidos fueron generados en 1998, de las cuales cerca del 60 % fueron usados beneficiosamente (por ejemplo, aplicaciones al suelo, compostaje, usados como relleno en vertederos) y 40 % eliminado (es decir, descartado sin ningún intento de recuperar los nutrientes u otras propiedades valiosas). Estima además, que al menos el 20 % de los biosólidos se manejaron por las instalaciones de rellenos sanitarios ya sea dispuesto allí (17%) o como cobertura del relleno (3 %). Un estimado adicional de 6 % fue manejado por las instalaciones de rellenos sanitarios pero en programas de compostaje. Así, cerca de un cuarto de todos los biosólidos se han gestionado por las instalaciones de rellenos sanitarios, en su mayoría por los operadores de vertederos. Así mismo estimó que para el año 2000, 7,1 millones de toneladas de biosólidos se

generarían para el uso o la eliminación, creciendo a 7,6 millones de toneladas en 2005 y a 8,2 millones de toneladas en 2010. De lo producido en el año 2010, estimó que 10 % podría ser depositado en vertederos, 3 % utilizado como cobertura del relleno, y, posiblemente 7 % utilizado en programas de compostaje, para un total de al menos 13 % a 20 %, posiblemente, de biosólidos que gestiona instalaciones de rellenos sanitarios.

Según Werther y Ogada (1999) citados por Inguanzo, 2004, la producción de materia seca de fangos de depuración procedente de tratamientos primarios y secundarios de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) se estima entre 60 y 120 gramos por habitante por día (media de 90 gramos por día y persona). Cuatro países (Francia, Alemania, Italia, y Reino Unido) producen el 84 % del lodo producido en la Unión Europea, y cuentan con el 82 % de las estaciones depuradoras. Alemania acapara el 41% del total, Reino Unido el 17 % y Francia el 13 %, al igual que Italia. Además, la cifra de fangos producidos al año 2002 en la Unión Europea es de 7,7 millones de toneladas al año (materia seca), que se incrementará un 38%, hasta los 10,7

millones de toneladas, al alcanzar los objetivos marcados en el 2005 por la legislación comunitaria. Rámila y Rojas (2008), informa que el valor promedio de biosólidos secos por año y por habitante en la Unión Europea es de 20 kg.

En España, según el Boletín Oficial del Estado (BOE, 2006) las Comunidades Autónomas que más lodos producen son Cataluña, Madrid y la Comunidad Valenciana. El Boletín Oficial del Estado (BOE, 2001), informa que existen pocas estadísticas o datos cuantificados sobre la generación de lodos en España, sólo algunas Comunidades Autónomas han hecho estimaciones acerca del volumen de lodos producidos y de su gestión, en todo caso existen datos procedentes de los planes de residuos de las Comunidades Autónomas y datos del Registro Nacional de Lodos (RNL) de EDAR, que elabora el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), difiriendo los valores según la fuente. En tal sentido la estimación según los reportes de las Comunidades Autónomas en el año 1998, asciende a alrededor de 800 000 toneladas de lodo, mientras que el RNL reporta 689 488 toneladas de lodo, ambos valores expresados en materia seca. En lo referente al destino o gestión que se hace de

estos residuos. En el citado Registro Nacional de Lodos de EDAR se estima en un 22 % los lodos que se depositan en vertedero, un 51 % que se destina a usos agrícolas y un 4 % son incinerados. Además, teniendo en cuenta las nuevas depuradoras construidas o en construcción, su capacidad, población a la que sirven, y aplicando ratios medios, se estimó que a finales del año 2005 la cantidad de lodos generados no será inferior a 1 300 000 toneladas y podría llegar, incluso, a 1 500 000 toneladas (BOE, 2001). Sin embargo para el año 2005, según el BOE (2006), la generación de lodos llegó solo a 1 119 741 toneladas (datos RNL), de los cuales el 65 % de estos lodos se destinaron a uso agrícola, una parte de ellos compostados. Las cantidades destinadas a valorización agrícola en los últimos años pasaron, de 606 119 (2001) a 725 433 toneladas (2005), lo que significa, en términos porcentuales un notable incremento.

En cuanto a estadísticas en América Latina, Dágner (2005), indica que las plantas de tratamiento de aguas residuales de Colombia generan 274 toneladas de biosólidos al día (94 toneladas, base seca). El 97 % de esta producción es generada por tres plantas: El Salitre (Bogotá), el Cañaveralejo

(Cali) y San Fernando (Medellín). Para el caso de Chile, Rámila y Rojas (2008), indican una producción proyectada de 92 418 toneladas de lodos en el año 2014 (base seca) para la Región Metropolitana de Santiago, donde actualmente existen tres macro-plantas de tratamientos de aguas servidas en operación; La Farfana, El Trebal y Mapocho, éstas, en conjunto con pequeñas plantas, pretendían sanear el 100 % de las aguas servidas de la región al 2010 (Rámila y Rojas, 2008; Henríquez, 2011); según Henríquez (2011) la generación de lodos en la región metropolitana de Santiago se estima en 1000 toneladas por día en base húmeda. Según Pedroza *et al.* (2010), se estima que la producción de lodo en el Brasil está entre 150 a 220 mil toneladas de materia seca por año, considerando que apenas 30 % de la población urbana tiene su alcantarilla debidamente colectada y tratada, es de esperarse que la generación de lodo superaría 400 mil toneladas de lodo por año en caso las aguas residuales fuesen totalmente tratados en el país. Según Andreoli *et al.* (1998), la ampliación de los servicios de colecta de aguas residuales tiene un potencial para multiplicar la producción de ese residuo en el Brasil en 3 a 4 veces. En México, Barrios *et al.* (2001) citados por Jurado *et al.* (2004) estiman que la

generación de biosólidos alcanzaría aproximadamente las 650 000 toneladas en materia seca por año.

2.4.2 Tipos de lodos

Metcalf y Eddy (1996) citados por Hernández (2004), mencionan que los tipos de lodos residuales dependen del tratamiento del agua residual; existen entre ellos los lodos primarios, lodos secundarios y lodos terciarios; además, los lodos producidos en la planta de tratamiento de aguas residuales, según la USEPA (1993) se pueden clasificar en las clases A y B (Tabla 3); la clase A se refiere a lodos residuales con niveles de patógenos no detectables; cumplen con estrictos requerimientos de atracción de vectores. Los de la clase B son lodos residuales tratados que contienen niveles detectables de patógenos, sin embargo, se pueden aplicar a suelos agrícolas con restricciones en cultivos.

2.4.2.1 Lodo primario

Es el lodo resultante del tratamiento primario del agua residual y que no ha experimentado ningún proceso de tratamiento, usualmente contienen de 93 % a 99,5 % de agua, así como sólidos y sustancias

disueltas que estuvieron presentes en el agua residual o fueron agregados durante los procesos de tratamiento del agua residual.

2.4.2.2 Lodo secundario

Los tratamientos secundarios del agua residual, involucran un proceso de clarificación primario seguido de un tratamiento biológico y una clarificación secundaria, el lodo generado por proceso de tratamiento secundarios del agua residual, tales como los sistemas biológicos activados y filtros de goteo, contienen de 0,5 % a 2 % de sólidos y son más difíciles de espesarse y deshidratarse que los lodos primarios.

2.4.2.3 Lodo terciario

Son producidos por tratamientos avanzados del agua residual, como la precipitación química y filtración. Los químicos usados en los procesos de tratamiento avanzado del agua residual, como el aluminio, sales, cal o polímeros orgánicos, aumentan la cantidad de lodo y por consiguiente el volumen del lodo.

2.4.3 Características de los lodos

Todos los lodos crudos tienen un contenido bajo de sólidos (1 - 6 %); por ello, la disposición de su pequeño contenido de sólidos requiere el manejo de un gran volumen de lodo. El problema principal en el tratamiento de lodos radica, por tanto, en concentrar los sólidos mediante la máxima remoción posible de agua y en reducir su contenido orgánico. Los lodos provenientes de aguas residuales están compuestos en especial por la materia orgánica removida del agua residual, la cual eventualmente se descompone y causa los mismos efectos indeseables del agua residual cruda (Romero, 2004).

Las características de los lodos varían mucho dependiendo de su origen, de su edad, del tipo de proceso del cual provienen y de la fuente original de los mismos (Hernández, 2004; Romero, 2004; Toro, 2005; Callejas, 2008), ya que entre más industrializada sea una ciudad, tendrá mayores posibilidades de contener metales pesados en mayor proporción y será un problema para aplicarlos a suelos agrícolas (Hernández, 2004). El volumen de lodo que se produce en un tanque de sedimentación debe conocerse o estimarse para cuantificar los diferentes componentes del sistema de tratamiento y

disposición de lodos. Dicho volumen depende principalmente de las características del agua residual, del grado de tratamiento previo, del tiempo de sedimentación, de la densidad de sólidos, del contenido de humedad, del tipo de equipo o método de remoción de lodos y de la frecuencia de remoción de los mismos (Romero, 2004).

En general, los lodos están constituidos, principalmente, por los elementos que componen el efluente, los aditivos químicos usados en el proceso y la masa bacteriana que participa en el tratamiento. Poseen una humedad cercana al 80 %, altos contenidos de materia orgánica, cercanos al 65 %, e importantes niveles de macro y micronutrientes; mientras la materia orgánica sirve como acondicionador de suelos, los macro y micronutrientes sirven como fuente de nutrientes para las plantas (Singh y Agrawal, 2008, citados por Callejas, 2008). Sin embargo, estos aspectos positivos deben balancearse con algunos factores de restricción, como la presencia de microorganismos patógenos, concentraciones indeseables de elementos metálicos traza y la posible presencia de compuestos orgánicos persistentes

potencialmente tóxicos (González, 2005, Martínez, 1995, citados por Callejas, 2008).

La composición del lodo según Hernández (2004) es fundamental en las siguientes decisiones de diseño:

- Si el lodo que se aplica es de bajo costo.
- Que práctica de aplicación es más factible.
- La cantidad que se aplicará anualmente o acumulativamente.
- El grado de control y los sistemas de monitoreo requerido.

Diferentes trabajos han señalado las características de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, las magnitudes de los parámetros medidos difieren debido a la peculiaridad de cada zona donde se realizaron las investigaciones, en la Tabla 1 se resumen las principales características de los lodos residuales.

Tabla 1

Características físico-químicas de lodos según diferentes autores.

Caracter	1	2	3	4	5	6
Tipo de lodo/tratamiento	Lodo procedente de residuos domésticos sometido a un tratamiento anaerobio de estabilización	Lodo procedente de residuos de industrias agroalimentarias sometido a un procedimiento de estabilización aerobio	-	-	Estabilizado con Ca(OH) ₂	Lodo seco
Localidad-país	Salamanca- España	Salamanca- España	Durango- México	Santiago- Chile	México D.F.	Puente Piedra-Perú
<u>Físico-químicos</u>						
Textura	-	-	Migajón arenosa	-	-	-
pH	6,6	5,7	7,1	7,00	9,77	6,97
Materia orgánica (%)	40,6	90,1	17,8	37,37	31	41,94
Materia seca (%)	22,2	25,8	-	-	-	-
C.E. (dS/m)	-	-	3,08	4,80	-	4,69 (mS/cm)
%N	1,57	1,66	1,14	2,22	1,06	-
C/N	15	28,5	-	9,9	17,88	-

sigue en la página 48...

...continua de la página 47

P (ppm)	-	-	286	1580	5032	-
K (ppm)	-	-	460	-	2374	-
Ca (ppm)	-	-	-	-	58266	-
Ca (meq/L)	-	-	18	-	-	-
Na (ppm)	-	-	315	-	4897	-
Na (meq/L)	-	-	13,7	-	-	-
<u>Metales</u>						
Cd (ug/g)	3,94	2,78	3,6	2	-	<2,00
Cr (ug/g)	39,9	21,5	-	187,4	-	12,4
Cu (ug/g)	193	90,4	142	359,9	154,907	-
Ni (ug/g)	41,3	49,9	<0,5	48,7	-	-
Pb (ug/g)	240	47,6	149	60,7	110,436	49,6
As (ug/g)	-	-	-	-	-	16,00
Hg (ug/g)	-	-	-	-	-	0,725
Zn (ug/g)	1124	497	1360	1984	-	-
Fe (ug/g)	-	-	1843	-	2640	-
Mn (ug/g)	-	-	179	347,4	7,00	-
<u>Microbiológicos</u>						
Coliformes fecales	-	-	-	1,9 - 1,2x10 ⁴	<100	14x10 - 16 x10 ⁴
<i>Salmonella sp.</i>	-	-	-	-	-	6 - 1600

Fuente; (1) y (2) Rodríguez, Andrades, Sánchez y Sánchez (2003); (3) Hernández *et al.* (2005); (4) Acevedo (2004); (5) Campos, García, Velásquez y García (2009); (6) Francisco, Ramos y Aguirre (2010).

2.4.4 Tratamiento de lodos

La eficiencia de una planta de tratamiento de aguas servidas está dada por la calidad del agua que produce, por esta razón, el tratamiento suele estar centrado exclusivamente en el agua, no considerando el impacto de los lodos sobre el medio ambiente o incluso sobre los costos de gestión de la planta, el tratamiento y la disposición final de lodos generados en el proceso de depuración; estas actividades, tienen que ver con menos del 1 % del volumen total de agua tratada, sin embargo consumen hasta el 50 % de los costos de capital y operación. No obstante, la eficiencia de la planta sólo puede mantenerse en el tiempo si se extraen de la corriente de agua los lodos producidos al ritmo adecuado, si la planta no dispone eficientemente su lodo y lo acumula, tendrá problemas en la corriente de lodos y por ende un efecto directo en la línea de agua afectando la calidad de esta última (Callejas, 2008).

El lodo es el producto residual de mayor volumen obtenido en el tratamiento de aguas residuales, y su procesamiento y almacenaje es posiblemente uno de los problemas

medioambientales más acuciantes en la actualidad. Esto se debe a que el lodo resultante de las operaciones de tratamiento de aguas residuales se encuentra en forma de una suspensión muy diluida, la cual contiene normalmente entre un 0,25 - 12 % de sólidos, dependiendo del proceso utilizado. Por otro lado, el lodo está compuesto en su mayoría por sustancias responsables de las características nocivas del agua residual (Inguanzo, 2004).

Antes de su disposición final, los lodos generados en los procesos de tratamiento primarios y secundarios deben ser sometidos a procesos de acondicionamiento que permitan estabilizar la materia orgánica, reducir al máximo los riesgos sanitarios y disminuir su contenido de humedad (Toro, 2005). La línea de tratamiento de fangos intenta reducir y/o prevenir la generación de olores, la atracción de vectores, la cantidad de los sólidos orgánicos, eliminar bacterias y microorganismos, así como reducir el contenido en agua (reducir su volumen) para facilitar su manejo, hacer más económico su transporte y disminuir su impacto medioambiental (Inguanzo, 2004; Toro, 2005).

Dentro de la línea de lodos existen variados procesos de tratamiento que se combinan para obtener un producto apto para su disposición final. Estos procesos se dividen principalmente en cuatro categorías: procesos físicos, químicos, biológicos y térmicos (Toro, 2005). Estos procesos están enfocados a dos aspectos fundamentales: (1) reducción de volumen y peso mediante la eliminación de agua, para ello los principales métodos empleados son el espesamiento, desaguado y secado; (2) reducción del poder de fermentación o estabilización que consiste en reducir la actividad biológica contenida en el lodo así como el contenido de microorganismos patógenos causantes de enfermedades, algunos métodos para ello son la estabilización con cal, tratamiento térmico, digestión anaerobia, digestión aerobia y compostaje (Metcalf y Eddy, 1995; Miranda y Reyes, 2005; Oropeza, 2006).

La selección del sistema de tratamiento depende de factores como: el costo del tratamiento, las características del lodo y sus requerimientos finales según sea la alternativa de eliminación que se les quiera dar (Callejas, 2008), además de

tener en cuenta las normativas que controlan su evacuación de las plantas de tratamiento de aguas residuales (Miranda y Reyes, 2005).

2.4.5 Utilización agrícola de lodos

Dada la importancia del uso de los materiales orgánicos en la actividad agrícola, de cara a mantener la capacidad productiva de los suelos y actuar sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de los mismos, es evidente la necesidad de su constante reposición y mantenimiento del ciclo de la materia orgánica en los agroecosistemas, lo cual ha estado ligado a la agricultura desde sus orígenes. Frente a las vías tradicionales de técnicas de mantenimiento y aportes de materia orgánica, cuya disponibilidad es a veces limitada, se encuentran otras fuentes como son los lodos de depuración. En la reutilización de esta fuente, aparece una aparente ventaja múltiple, como es la eliminación de residuos, por una parte, y el beneficio agronómico, por otra, contribuyendo así al logro de una agricultura sostenible (Aller *et al.*, 1999).

En algunos países, los lodos residuales debían ser confinados para evitar contaminación a terrenos agrícolas o forestales, pero al confinar estos lodos se están confinando también gran cantidad de elementos esenciales para las plantas, por lo que el ciclo de los minerales se ve interrumpido. Esta acción de confinamiento va en contra de la naturaleza, debido a que por millones de años se ha llevado a cabo un proceso de reciclaje de minerales en el sistema plantas-animales-microorganismos-suelo (Jimenes *et al.*, 2002, Clevenquer *et al.*, 1983, citados por Hernández, 2004).

La aplicación de lodos residuales reduce costos de fertilización, además de mejorar las propiedades químicas y físicas del suelo, por contener buena cantidad de nitrógeno, fósforo, materia orgánica y micronutrientes esenciales en la nutrición vegetal que ayudan a incrementar el rendimiento de los cultivos (Camargo y Bettiol, 2000; Miranda y Reyes, 2005; Utria *et al.*, 2008). El fango puede así sustituir la utilización de fertilizantes artificiales, cuya producción requiere un consumo considerable de energía (Inguanzo, 2004). Así mismo, el lodo puede ser aplicado a la tierra directamente o puede ser

procesado como por ejemplo, compost y pellets (Miranda y Reyes, 2005).

Sin embargo, su aplicación en suelos agrícolas presenta algunos aspectos negativos, como son la presencia de metales pesados y microorganismos patógenos que pueden influir negativamente tanto en los suelos como en las plantas de cultivo. El contenido de metales pesados representa la principal limitante para el uso de los biosólidos en la agricultura. Entre estos metales existen algunos como el Cu, Zn, Ni, Fe y Mn que son elementos esenciales para las plantas y su deficiencia puede provocar problemas en los cultivos, mientras que si se encuentran en exceso implican riesgos de fitotoxicidad. Existen otros como el Cd, Hg, As y Pb que no tienen funciones fisiológicas reconocidas y su presencia en el suelo siempre será un riesgo potencial, ya que pueden contaminar y acumularse en los suelos, el agua y los alimentos (Utria *et al.*, 2008).

Un elemento importante para establecer las potencialidades reales de utilización de lodos es el costo asociado a su

aplicación en suelo. Las restricciones pueden aumentar significativamente estos costos, y provienen de aspectos como el contenido de elementos contaminantes, así como de las normas vigentes en cada país. Estos elementos contribuyen a determinar las características de los lodos que es posible aplicar por unidad de superficie, así como los niveles de control y sistemas de monitoreo exigidos (Toro, 2005).

La utilización benéfica de los lodos en suelos persigue, entonces, 2 objetivos principales. Uno es el de aprovechar su potencial fertilizante (determinado por su contenido de nutrientes) y sus características físicas como elemento mejorador de suelos y el otro es el de disponer adecuadamente los sólidos resultantes del proceso de tratamiento de las aguas, sin aumentar la masa de residuos sólidos que nuestra sociedad produce diariamente y que resulta cada vez más difícil ocultar. Ambos objetivos se pueden lograr simultáneamente y la cuestión es buscar una combinación de requisitos y condiciones que permita lograr esta ecuación a un costo relativamente razonable. Para ello

se debe lograr que las normas y reglamentos resguarden adecuadamente la salud humana y la calidad del medio natural, al mismo tiempo que permitan optimizar el aprovechamiento de nutrientes, al máximo que las tasas agronómicas permitan aplicar. Por otra parte, a los generadores de lodos interesa que estos puedan ser dispuestos en un mínimo de superficie posible, para minimizar los costos de transporte, disposición y control (Leppe *et al.*, 2002).

Cualquiera sea el destino final de los lodos producidos, sin embargo, estos deberán someterse a algunos procesos de acondicionamiento, que permitan reducir al mínimo los riesgos sanitarios. Estos en relación con la reducción del potencial de atracción de vectores y con requisitos de higienización que permitan reducir o eliminar el contenido de patógenos (Leppe *et al.*, 2002).

2.4.5.1 Parámetros a considerar en los lodos

Miranda y Reyes (2005) indican que los parámetros de lodos, importantes para definir su aptitud de ser aplicados al suelo son:

- **Contenido orgánico.** El contenido orgánico es importante para la concentración de nitrógeno y fósforo, afectan el valor fertilizante del lodo para ser aplicado en forma benéfica al suelo.
- **Patógenos.** Una significativa proporción de bacterias, virus, protozoos y huevos de helmintos llegan a concentrarse en un lodo durante el tratamiento de las aguas servidas. Un pequeño porcentaje de estos pueden causar enfermedades, es decir ser patógeno. Los patógenos son difícil de cuantificar, debiendo manejar indicadores que permitan estimar su reducción.
- **Metales.** El lodo puede contener varias cantidades de metales pesados e iones orgánicos totales tales como boro, cadmio,

cobre, plomo, níquel, mercurio, plata y zinc. A bajas concentraciones en el suelo, algunos de estos elementos son micronutrientes esenciales requeridos por plantas y animales, y con frecuencia se adicionan en fertilizantes y alimentos suplementarios. Sin embargo a altas concentraciones pueden ser tóxicos para humanos, animales y plantas.

- **Nutrientes.** El valor del lodo como fertilizante se basa principalmente en su contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, y se debe determinar en aquellos casos en el que el lodo se vaya a emplear como acondicionador de suelo. El nutriente requerido en mayor cantidad por los cultivos es el nitrógeno.

2.4.5.2 Manejo en la aplicación de lodos en suelos agrícolas

La aplicación al terreno es mucho más fácil de implementar en lugares en donde se dispone de terrenos agrícolas cercanos a la producción de

biosólidos; sin embargo, los avances en las actividades de transporte han hecho que la aplicación de biosólidos al terreno sea viable incluso en distancias de transporte mayores a 1000 millas (United States Environmental Protection Agency [USEPA], 2000).

La disposición de los lodos en suelos agrícolas representa una estrategia para reciclar los nutrientes en las plantas (no así los mono-rellenos e incineración que no devuelven los nutrientes a la producción agrícola). Esto genera la necesidad de desarrollar un plan de manejo de los nutrientes, los que limitan la cantidad de lodo a aplicar, en base al pH del suelo y la necesidad de nutrientes para el adecuado crecimiento y producción de cultivos. Las limitaciones a la aplicación de lodos en suelos están determinadas en función de la composición del lodo, las propiedades del suelo y las características medioambientales (Miranda y Reyes, 2005).

2.4.5.3 Mineralización de lodos

Los biosólidos al igual que los estiércoles tienen en común que su utilización apropiada como fertilizantes orgánicos y mejoradores del suelo depende del porcentaje de descomposición de sus estructuras orgánicas. Es decir, la tasa de mineralización del nitrógeno orgánico es la clave para el cálculo de dosis apropiadas sin afectar el ambiente (Flores, s.f.).

El reciclaje apropiado de los nutrientes contenidos en los abonos orgánicos tales como estiércoles, compostas y biosólidos, entre otros, a través de su incorporación en suelos agrícolas requiere del conocimiento del porcentaje de descomposición o también llamada “tasa de mineralización”. Este porcentaje debe ser estimado para diferentes condiciones edáficas y agroecológicas, de tal manera que puedan utilizarse de apoyo en el cálculo de dosis del abono orgánico de interés (Flores, s.f.).

El concepto de dosis agronómica ha sido definido como la cantidad de nitrógeno requerido por los cultivos para alcanzar un potencial productivo dado en un período de crecimiento definido, de tal manera que la cantidad de nitrógeno en los biosólidos que pase el perfil radicular del cultivo sea minimizado para evitar un impacto negativo en la calidad del agua freática (Barbarick e Ippolito, 2000). La dosis agronómica depende del contenido de nitrógeno en el biosólido, suelo y agua de riego, de la tasa de descomposición del nitrógeno orgánico del biosólido y de la demanda de nitrógeno del cultivo asociado a un potencial de rendimiento (Cogger y Sullivan, 2007).

Algunos valores representativos de nitrógeno mineralizable reportados para biosólidos en los Estados Unidos son: 30 % para biosólido estabilizado con cal, 15 % para biosólido anaeróbicamente digerido y de 5 % a 10 % para

biosólido compostado (NRC, 1996, citado por Flores, s.f.).

Particularmente, la adición de cal en el proceso de tratamiento de biosólidos puede aumentar el pH del suelo, y las adiciones de biosólidos pueden incrementar la capacidad amortiguadora de pH de un suelo (Pierzynski, 1994, citado por Flores, s.f.). Las tasas de mineralización de nitrógeno orgánico en biosólidos secos o en compostas son menor que aquellas observadas en biosólidos líquidos y biosólidos desaguados. Por ejemplo, los biosólidos con estabilización alcalina pueden presentar de 50 % a 55 % de mineralización de nitrógeno durante el primer año, mientras que la mineralización de nitrógeno en biosólidos compostados es de 10 % anual (Flores, s.f.). Barbarika, Sikora y Colacicco (1985) reportaron valores de N orgánico mineralizado de 1,8 % a 60,3 % a diferentes temperaturas del suelo (17 °C a 35 °C) y tiempos de incubación (5 a 16 semanas), el parámetro que

mejor correlaciona es la relación C/N del biosólido y del suelo.

2.4.5.4 Propiedades de los lodos: la adsorción

Según Harris y Urie (1986) citados por Durante (1990), una parte de los metales presentes en los suelos enmendados con lodos quedan inmovilizados en la capa de humus de los mismos. La materia orgánica presente en los lodos presenta una alta capacidad adsortiva; esta capacidad se ve aumentada por la presencia, a veces mayoritaria, de elementos como el hierro o el manganeso, con importantes propiedades adsortivas que dependen principalmente de su conversión en hidróxidos.

También es importante la fracción orgánica soluble producida durante la descomposición microbiológica del lodo en el suelo, ya que forma complejos solubles con los metales existentes en el mismo (Durante, 1990).

Según O'Connor *et al.* (1984) citados por Durante (1990), la presencia de ligandos orgánicos reduce sensiblemente la actividad de los metales en solución; sin embargo, estas complejaciones orgánicas son temporales, Campanella *et al.* (1989) citados por Durante (1990) indican que la retención de iones en la superficie de las partículas de los lodos adquiere gran relevancia en los procesos que tienen lugar dentro del complejo iónico del suelo. En general, los iones adsorbidos presentan un alto carácter intercambiable, lo cual da lugar a un complejo catiónico muy variable, tanto más por la presencia mayoritaria de cationes en lodos (hierro, calcio, magnesio, potasio, entre otros). La presencia de partículas coloidales en un lodo posibilita la adsorción de estos elementos. Las propiedades adsorbentes de los lodos están limitadas por una serie de parámetros, entre los que destacan:

- Factores relativos a la composición del suelo: contenido en materia orgánica, tipo de estructura

y propiedades químicas del suelo, entre las que destaca el pH.

- Factores medioambientales, entre los que destacan los factores climáticos: temperatura, evaporación-precipitación y humedad.
- Factores relativos al metal: el tipo de metal, sus características químicas y su concentración son factores limitantes.
- Factores relativos a las plantas: el tipo de planta y su morfología tiene un papel muy importante en la distribución de los metales en el suelo y frente a la asimilación de metales por parte de éstas.
- Factores relativos al lodo: contenido en materia orgánica (tasa C/N), contenido en elementos que se pueden incorporar al complejo intercatiónico del suelo y tener gran importancia dentro de las reacciones químicas que tienen lugar en dicho complejo.

2.4.5.5 Metales pesados en lodos

Un metal pesado es considerado aquel elemento con número atómico mayor a 20 o con una densidad de 5 g/cm³, excluyendo los metales alcalinos y alcalino-térreos (Torral, 1996, citado por Acosta, 2007; Breckle, 1991, Tiller, 1989, citados por Diez, 2008). Diez (2008), señala que el término “metal pesado” resulta algo impreciso si se tienen en cuenta las propiedades físico-químicas de los elementos; de acuerdo con Tiller (1989) citado por el mismo autor, parece que el término de “metal pesado” puede ser utilizado de una forma globalizadora para referirse a aquellos metales clasificados como contaminantes ambientales. Según García y Dorronsoro (2013) y Acosta (2007), existen dos tipos de clasificación para los metales pesados; los micronutrientes (oligoelementos) y los que no tienen función biológica conocida. Los micronutrientes son necesarios fisiológicamente para los organismos en pequeñas concentraciones, al exceder de éstas, se vuelven nocivos. Entre los micronutrientes metálicos

se encuentran: B, Co, Cr, Cu, Fe, Mo, Mn, Ni, Se, Zn y el metaloide As. El otro grupo de metales pesados son: Cd, Hg, Pb, Bi, Sb, Sn y Tl. Éstos pueden producir complicaciones biológicas por ser altamente tóxicos y su tendencia a la acumulación en plantas y animales.

Numerosos estudios han abordado el tema de lodos residuales y por unanimidad han expuesto el carácter tóxico de los mismos para los seres vivos y los ecosistemas. Metales pesados (Pb, As, Cd, Cu, Hg, Zn, Ni y Cr) se han encontrado en aguas residuales en concentraciones variadas, debido a las descargas industriales, talleres mecánicos y galvanizado entre otros. Los metales pesados afectan a las cadenas alimenticias, provocando un efecto de bioacumulación entre los organismos que la componen. Ello es debido a su alta persistencia en el entorno, al no tener, la mayoría de éstos, una función biológica definida. Bastante conocido es el caso en el que se incorporan a la cadena alimenticia

a través de los organismos filtrantes presentes en los sedimentos (Maboeta y Van Rensburg, 2003, citados por Fayett, 2008).

El mayor peligro de los metales pesados consiste en el lixiviado y el potencial toxicológico hacia plantas y animales. Pero según NRC (1996) citado por Jiménez, Barrios y Maya (2000), la asimilación de metales pesados por plantas es mínima, por su parte Vaca *et al.* (2002) al evaluar la calidad nutrimental en *Zea mayz* cultivado en suelo acondicionado con lodo residual, concluye que la calidad nutrimental no se vio afectada por la adición de lodos residuales y que las cantidades de los componentes nutrimentales son las suficientes para que este vegetal sea apto para el consumo humano. Asimismo, Fayett (2008) menciona que para obtener concentraciones elevadas de metales pesados en el suelo es necesario realizar varias aplicaciones de biosólidos. Por su parte Acevedo (2004), indica que los

problemas asociados a metales pesados se agudizan en suelos de pH ácido.

2.4.5.6 Patógenos en lodos

Por patógeno se entiende cualquier organismo capaz de causar una enfermedad. Los patógenos pueden infectar a los humanos por muchas vías incluyendo la ingestión, la inhalación o el contagio por contacto físico a través de la piel. La dosis o el número de organismos patógenos a los que debe exponerse una persona para ser infectada depende del tipo de organismos y de la salud de la persona expuesta (Hernández, 2010).

En relación a las aguas residuales, la concentración de microorganismos patógenos guarda relación con factores como las condiciones socio-económicas, sanitarias y de salud de la población, la región, la presencia de animales y el tipo de tratamiento al que el lodo fue sometido (Andreoli, Lara y Fernandes, 1999, citados por Torres, Madera y Silva, 2009); su

presencia implica que la aplicación directa de biosólidos sin tratamiento previo representa riesgos para la salud humana y biótica (Kiely, 1999, citado por Torres *et al.* , 2009). Los agentes patógenos más importantes que existen en el agua y que se han encontrado en los lodos son las bacterias (como la *Salmonella*), los virus (sobre todo, enterovirus), los protozoos, los trematodos, los cestodos y los nemátodos (Hernández, 2010). Los coliformes fecales son comúnmente utilizados como indicadores de contaminación fecal en aguas residuales. Su uso en lodos y biosólidos usualmente indica la eficiencia de los procesos de tratamiento en la destrucción de bacterias, y además regula la calidad de los biosólidos que pueden reusarse benéficamente. Generalmente, también son indicadores de la concentración de *Salmonella* spp., bacterias que usualmente se relacionan con enfermedades gastrointestinales en humanos y por lo tanto, la reducción de coliformes fecales idealmente refleja un decremento en *Salmonella*

spp. (Castrejón *et al.*, 2001). De la misma manera, aunque la *E. coli* no se considera patogénica, frecuentemente se usa para indicar lo adecuado o inadecuado de un proceso de tratamiento en reducción de patógenos, por ser muy abundante en el biosólido (Giraldo y Lozano De Yunda, 2006). Según Xavier (2009), dentro de los patógenos considerados, los riesgos más elevados parecen estar relacionados a la transmisión de virus y, en la secuencia, la de helmintos, protozoarios y, por último de bacterias.

Para que cualquier vertido de los lodos sea seguro se precisa la eliminación, o al menos una inactivación suficiente, de estos agentes patógenos (Hernández, 2010). Entre los tratamientos más comunes para la reducción de patógenos en biosólidos se encuentran el compostaje, la estabilización alcalina y el tratamiento térmico, los cuales utilizan como mecanismos de remoción la radiación solar, la elevación del pH y el aumento de

la temperatura. La intensidad y los tiempos de exposición de la masa de biosólido en estos mecanismos son determinantes para una eficiente desinfección. Los métodos de higienización deben ser económicos, seguros y de fácil aplicación práctica (Fernandes y Souza, 2001, citados por Torres *et al.*, 2009).

2.4.5.7 Normativa sobre el uso de lodos en agricultura

En el Perú, el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2011) en su Norma OS.090, referida a Plantas de tratamiento de aguas residuales, considera la aplicación de lodos sobre el terreno, indicando que los terrenos donde se aplique lodos deben estar ubicados por lo menos a 500 m de la vivienda más cercana, además este terreno deberá tener una pendiente inferior de 6 % y su suelo deberá tener una tasa de infiltración entre 1 a 6 cm/h con buen drenaje, de composición química alcalina o neutra, debe ser profundo y de textura fina. El nivel freático debe estar ubicado por lo menos a 10 m de

profundidad. Esta norma también indica que se deberá tener en cuenta aspectos como la concentración de metales pesados en los lodos y compatibilidad con los niveles máximos permisibles, cantidad de cationes en los lodos y capacidad de intercambio catiónico, tipo de cultivo y forma de riego, etc.

En la normativa extranjera de manejo de lodos se establecen requisitos de protección ambiental específicamente relacionados con las características de los lodos utilizados en la agricultura, entre ellos: el contenido de metales pesados, el contenido de microorganismos patógenos y el potencial de atracción de vectores sanitarios. Estos determinarán los requisitos de tratamiento, la tasa máxima de aplicación y las restricciones respecto del tipo de cultivo o suelo (CONAMA, 1998, citado por Toro, 2005).

El uso y disposición de los lodos sanitarios tratados (biosólidos) en los Estados Unidos está regulado específicamente por el Código de Regulaciones Federales Título 40 (40 CFR), Subcapítulo O, Secciones 501 y 503 (USEPA, 2006b, citado por Orama, 2009), elaborado por la EPA. En estas secciones, se establecen las regulaciones específicas para el manejo de los lodos sanitarios así como los estándares para el uso y la disposición de este desperdicio. La Sección 503 en especial regula la utilización de lodos sanitarios en aplicaciones al terreno, incineración y reducción de patógenos y vectores. Esta sección también incluye los requisitos de reportes y análisis para las instalaciones que manejan este desperdicio, así como los mecanismos de manejo, límites de contaminantes (Tablas 2 y 3) y estándares operacionales (Orama, 2009).

Tabla 2

Contenido máximo de metales pesados en biosólidos aplicados a suelos según la Norma 40 CFR Parte 503 (1993) de la EPA.

Concentraciones de contaminantes y tasas de carga				
Metal pesado	Conc. máxima permitida (mg/kg)¹	Tasa acumulada de carga contaminante (kg/ha)	Conc. media mensual (mg/kg)¹	Tasa anual de carga contaminante (kg/ha/año)
Arsénico	75	41	41	2
Cadmio	85	39	39	1.9
Cromo	3000	3000	1200	150
Cobre	4300	1500	1500	75
Mercurio	57	17	17	0,85
Molibdeno	75	18	18	0,90
Níquel	420	420	420	21
Plomo	840	300	300	15
Selenio	100	100	100	5
Zinc	7500	2800	2800	140
Aplicado a:	Todos los biosólidos aplicados al suelo	Biosólidos a granel	Biosólidos a granel y en bolsa	Biosólidos empacados

¹ En base a peso seco; Fuente: USEPA (1993)

Tabla 3

Contenido de patógenos en biosólidos clase A y B según la Norma 40 CFR Parte 503 (1993) de la EPA.

Clasificación	Clase A	Clase B
Coliformes fecales	< 1000 NMP/g de ST	< 2000 NMP/g de ST ó < 2000 UFC/g de ST
Salmonella spp.	< 3 NMP/4g de ST	-
Huevos viables de helmintos	< 1/4g de ST	-
Virus entéricos	< 1 UFP/4g de ST	-

ST = Sólidos totales (En base a peso seco); NMP = Número más probable; UFC = Unidades formadoras de colonia; UFP = Unidades formadores de placa. Fuente: USEPA (1993)

Para el caso de los países europeos, existe para la Comunidad Económica Europea (CEE) la Directiva 86/278/CEE, relativa a la protección del ambiente y en particular de los suelos en la utilización con fines agrícolas. Esta Directiva regula las condiciones en que podrán ser aplicados los lodos de depuradora a los suelos agrícolas, condiciones tendentes a la protección del posible efecto nocivo sobre las aguas, el suelo, la vegetación, los animales y el propio

hombre. Dicha Directiva prohíbe el empleo de los lodos de depuradora sin tratar, salvo en casos de inyección directa o que ese se entierre en el suelo, siempre y cuando sea autorizado por Estados Miembros (cabe mencionar que España no cuenta con dicha autorización). Asimismo, y con el fin de proteger la salud, prohíbe la aplicación en determinados cultivos, al mismo tiempo que establece plazos para su aplicación en los ya autorizados. Señala también que la utilización de los lodos en agricultura debe hacerse teniendo en cuenta las necesidades de nutrientes de las plantas. Al mismo tiempo limita los contenidos en metales pesados (Tabla 4) y exige análisis periódicos de los suelos y de los lodos de depuradora. Finalmente establece la exigencia de un control estadístico de los lodos de depuradora producidos, cantidades dedicadas a fines agronómicos, composición y características de los lodos de depuradora, tipos de tratamiento, destinatario y lugar de aplicación (Rodríguez, 2010). Desde finales de los 90, la

Comisión ha ido elaborando documentos de trabajo sobre una posible revisión de la Directiva 86/278/CEE (Generalitat Valenciana, 2008; Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009). En estos borradores se han incluido, además de los metales pesados que deben ser controlados, otros contaminantes como los compuestos orgánicos y los microorganismos patógenos (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009).

Tabla 4

Valores límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización en agricultura según la Directiva 86/278/CEE de la CEE.

Parámetros	Valores límite (mg/kg de materia seca)
Cadmio	20 - 40
Cobre	1000 - 1750
Níquel	300 - 400
Plomo	750 - 1200
Zinc	2500 - 4000
Mercurio	16 - 25
Cromo	-

Fuente: Comunidad Económica Europea (CEE, 1986)

2.5 Aspectos generales del maíz

2.5.1 Taxonomía

El maíz (*Zea mays* L.), es uno de los granos alimenticios más antiguos e importantes que se conocen. Otras especies del género *Zea*, comúnmente llamadas teosinte y las especies del género *Tripsacum* conocidas como arrocillo o maicillo son formas salvajes parientes de *Zea mays*. Son clasificadas del

Nuevo Mundo porque su centro de origen está en América (Bonilla, 2009), y según su sistemática el Centro para el Desarrollo Agropecuario y Forestal (CEDAF, 1998) indica que el maíz se encuentra clasificado como sigue:

Reino	:	Vegetal
División	:	Espermatofitas o Fanerógamas
Subdivisión	:	Angiospermas
Clase	:	Monocotiledoneae
Subclase	:	Glumiflorae
Orden	:	Poales
Familia	:	Poaceas o Gramineae
Tribu	:	Maydeae
Género	:	<i>Zea</i>
Especie	:	<i>Zea mays</i> L.
Nombre común	:	Maíz

2.5.2 Requerimientos agroecológicos

El maíz es una planta dotada de una amplia capacidad de respuesta a las oportunidades que ofrece el medio ambiente, y tiene alto nivel de respuesta a los efectos de la luz.

Actualmente, existen diversidad de cultivares útiles para su cultivo bajo condiciones naturales muy distintas de las propias de su hábitat original (Deras, 2011).

2.5.2.1 Latitud

En general, el maíz se adapta desde los 50° de latitud norte hasta alrededor de 40° de latitud sur. Esta es una amplia franja que abarca múltiples regiones agrícolas del mundo. Las regiones más productoras de maíz se caracterizan por presentar altas temperaturas y suficiente radiación solar (CEDAF, 1998).

2.5.2.2 Luz y fotoperiodo

El maíz es una de las plantas cultivadas que más responde a los efectos de la luz. Depende de la luz solar intensa y prolongada para su mejor y más rápido desarrollo (CEDAF, 1998). Los mayores rendimientos se obtienen con 11 a 14 horas de luz por día (Bonilla, 2009).

2.5.2.3 Altitud

En los trópicos, el maíz crece desde el nivel del mar hasta elevaciones cercanas a los 4000 metros sobre éste. Es posible cultivar maíz, con óptimos rendimientos, desde el nivel del mar hasta alrededor de 2500 msnm. Los rendimientos disminuyen en altitudes mayores a los 3000 msnm (CEDAF, 1998).

2.5.2.4 Temperatura

El maíz exige un clima relativamente cálido (Bonilla, 2009). La temperatura óptima durante el ciclo vegetativo del maíz es de 25 a 30 °C. Contando con un adecuado suministro de agua, la máxima velocidad de crecimiento se alcanza con temperaturas diurnas de 28 a 30 °C (CEDAF, 1998). Temperaturas menores de 10 °C retardan o inhiben la germinación (CEDAF, 1998; Bonilla, 2009).

Los días soleados seguidos de noches frescas, son los más beneficiosos para el crecimiento rápido del maíz (CEDAF, 1998; Cruz, 2013). Si ocurren altas

temperaturas nocturnas, las plantas consumen demasiada energía en la respiración celular, y la cantidad total de material que se acumula en los granos es menor que en las noches frescas, cuando la respiración es menos intensa (CEDAF, 1998). Temperaturas de 30 a 35 °C pueden reducir el rendimiento y disminuir el contenido de proteínas del grano, especialmente cuando falta el agua (CEDAF, 1998; Bonilla, 2009).

2.5.2.5 Precipitación

La cantidad, distribución y eficiencia de la lluvia son factores importantes en la producción de maíz. El calor y la sequía durante el período de polinización, a menudo causan la desecación del tejido foliar y la formación deficiente del grano. La condición ideal de humedad del suelo, para el desarrollo del maíz, es el estado de capacidad de campo. La cantidad de agua durante la temporada de crecimiento no debe ser menor de 300 mm. La cantidad óptima de lluvia es de 550 mm y la máxima de 1000 mm (Bonilla, 2009).

El cultivo del maíz exige niveles óptimos de humedad, dependiendo de si se cultivan variedades precoces (70-90 días) o tardías (130-150 días) (CEDAF, 1998). El maíz es muy sensible también al aniego o encharcamiento; es decir, a los suelos saturados y sobresaturados (Deras, 2011).

2.5.2.6 Suelos

El maíz se adapta a una amplia variedad de suelos donde puede producir buenas cosechas (Bonilla, 2009; CEDAF, 1998), siempre que se utilicen variedades adecuadas y técnicas de cultivo apropiadas. Los peores suelos para el maíz son los excesivamente pesados (arcillosos), por su facilidad para inundarse, y los muy sueltos (arenosos) afectan el desarrollo de las plantas por su propensión a secarse demasiado. En general, los mejores suelos para el cultivo del maíz son los de textura media (francos), fértiles, profundos y con elevada capacidad de retención de humedad (CEDAF, 1998). Es recomendable que el contenido de materia

orgánica sea bueno y que la topografía sea plana o ligeramente ondulada (Bonilla, 2009). Puede cultivarse maíz con buenos resultados en suelos con pH entre 5,5 y 8,0, aunque los mejores resultados se obtienen en suelos ligeramente ácidos (CEDAF, 1998), por lo que el pH óptimo oscila entre 5,6 y 6,5 (Bonilla, 2009). El maíz es medianamente tolerante a la salinidad (CEDAF, 1998).

2.5.3 Etapas fenológicas

Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI, 2012), las fases fenológicas del maíz son: emergencia, aparición de hojas, panoja, espiga, maduración lechosa, maduración pastosa y maduración córnea. El CEDAF (1998), indica que la duración de las etapas fenológicas depende de la variedad, así como de la temperatura, la que a su vez está determinada por la altura sobre el nivel del mar y el fotoperíodo, en la Tabla 5 se presenta según el mismo autor un modelo ampliamente aceptado por los especialistas en este cultivo.

Tabla 5

Etapas de desarrollo fenológico del maíz.

Etapas	Descripción
VE	Coleóptilo e emerge de la superficie del suelo
V3	Tres hojas completamente desarrolladas
V6	Seis hojas completamente desarrolladas
V9	Nueve hojas completamente desarrolladas
V12 a V15	Doce a quince hojas completamente desarrolladas
V18 a V22	Dieciocho a veintidós hojas completamente desarrolladas
VT	Visible la última rama de la espiga, pero los estigmas aún no han emergido
R1	Emisión de los estigmas
R2	Etapas de ampolla, diez a doce días después de la fertilización (ddf)
R3	Etapas de leche, 18 ddf
R4	Etapas de masa, 24 a 28 ddf
R5	Etapas de dentado, 35 ddf
R6	Madurez fisiológica, 55 a 65 ddf

Fuente: CEDAF (1998)

2.5.4 Maíz híbrido XB-8010

Aghricol S.A.C. es la empresa semillerista que produce semilla certificada del maíz híbrido XB-8010, dando garantía de ello; la zona de producción es el departamento de Ica. Las características del Híbrido XB-8010, se presentan en la Tabla 6.

Aghricol S.A.C. (2007), menciona las siguientes recomendaciones para el manejo del Híbrido XB-8010:

- Preparación de suelo: efectuar un riego de machaco y con el suelo a punto prepararlo mediante la utilización de arados/gradas para dejarlo bien mullido.
- Siembra: si es a lampa 0,85/0,90 m entre surco y 0,30/0,25 m entre golpe sembrar 2/3 semillas por golpe y al desahije dejar 6 a 7 plantas por metro lineal. Si la siembra es a máquina utilizar el mismo distanciamiento entre surco y 7/8 semillas por metro lineal para luego al desahije dejar 6 a 7.
- Fertilización al suelo: efectuar análisis del suelo para determinar los exactos requerimientos. Dosis mínima sugerida de N-P-K: 200 - 100 - 200.

Tabla 6

Características del Maíz Híbrido XB-8010.

Tipo de Híbrido	Doble
Altura de planta	2,20 m
Inserción de mazorca	0,90 m
Nº de mazorcas por planta	Superior a 1 en promedio
Longitud de mazorca	17 cm
Forma de la mazorca	Cilíndrica
Nº de granos/hilera	36
Nº de hileras/mazorca	12-14 hileras
Ciclo precoz	855 U.C.A. Floración
Tipo de grano	Duro
Color de grano	Anaranjado
Peso de 1000 granos	365 gr.
Relación grano / coronta	84/16
Diámetro coronta	2,77 cm
Hojas – Color	Verde intenso
Hojas inserción	Semi erecta
Potencial de rendimiento y estabilidad	Excelente
Días de cosecha:	
Invierno	135 / 150 días
Verano	120 / 125 días
Densidad de plantas siembra	
Desahije	70 / 78 000
Grosor de tallo	2,10 a 2,30 cm
Resistencia a la tumbada	Excelente

Fuente: Aghricol S.A.C. (2007)

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo y diseño de la investigación

El presente trabajo fue de carácter experimental; sin embargo, se realizó también un análisis de la situación socio-económica y política en el marco del tema investigado.

3.2 Materiales y/o instrumentos

a) Fuentes de información

Las fuentes de información relevantes sobre la aplicación de lodos utilizadas en el presente estudio corresponden a las siguientes:

- Literatura extranjera sobre uso de lodos en suelos agrícolas.
- Normativa peruana y normas extranjeras respecto de la clasificación, manejo sanitario y de la aplicación de lodos al

suelo. Se efectuó una comparación de las normas respecto a sus criterios técnicos, requisitos sanitarios y ambientales.

- Base de datos de proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales en Tacna, respecto de la generación de lodos, el destino final de los lodos y de los seguimientos ambientales de aquellos proyectos con planes de aplicación de lodos.

b) Lodo residual

El lodo residual fue obtenido de los lechos de secado de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Copare y Magollo (Tacna).

c) Suelo

El suelo utilizado en este trabajo fue colectado del terreno del Instituto de investigación, producción y extensión agraria (INPREX) - Tacna.

d) Planta indicadora

La planta indicadora fue el Maíz (*Zea mays* L.). Se utilizó semilla certificada del Híbrido XB 8010.

e) Equipos e instrumentos

Obtención/homogenización/muestreo de los lodos y suelo agrícola e instalación del experimento y cálculo de la cantidad de los lodos en los lechos de secado

- Sacos de polietileno
- Mantas de polietileno
- Mascarilla
- Guantes de jebe
- Bolsas de polipropileno 8 x 12 x 2
- Bolsas herméticas 26,8 x 27,9 cm
- Frascos plásticos
- Gel pack
- Cooler
- Pala
- Bieldo
- Carretilla
- Wincha
- Regla graduada
- Romana de 5 kg
- Rafia

- Tamiz
- Balanza electrónica

Evaluación del efecto de los lodos en la planta indicadora

- Bolsas 17 x 18 x 4
- Regla graduada
- Vernier o pie de rey
- Baldes de 4 y 20 L
- Úrea
- Fosfato diamónico
- Sulfato de potasio
- Tablero, cuaderno de apuntes
- Cámara digital

Obtención de peso seco y peso fresco de la planta indicadora

- Balanza analítica
- Estufa
- Papel periódico
- Plumón indeleble

3.3 Población y muestra

a) PTAR

La ciudad de Tacna tiene las plantas de tratamiento de aguas residuales de Copare y Magollo, ambas constituyeron la muestra para el presente trabajo. El volumen mensual tratado de aguas residuales promedio es de 885 000 m³ (340 L/s) (SUNASS, 2012) y los volúmenes de ingreso de agua residual, según la SUNASS (2013) son de 50 - 60 L/s y 320 L/s para Copare y Magollo respectivamente.

b) Lodo residual

Se obtuvo una muestra representativa de lodos de los lechos de secado de cada una de las PTAR (Copare y Magollo). Los lodos se encuentran sobre estos lechos desde el mes de mayo de 2012, en pleno proceso de deshidratación (único tratamiento según la NORMA OS.090 inciso 5.9.1.3). Se extrajo un total de 50 kg de lodo aproximadamente de cada PTAR, el lodo fue extraído de varios puntos, procurando que la muestra sea representativa del área total de los lechos de secado, posteriormente fueron transportados al INPREX en sacos de

polietileno, homogeneizados y pasados a través de un tamiz de 2 mm; de estos lodos se extrajeron las muestras para los respectivos análisis. Al momento de la recolección se tuvo especial cuidado de no incluir material del cual estuvo constituido el lecho de secado.

c) Suelo

Muestras superficiales del suelo (0 - 15 cm) fueron extraídas del INPREX; posteriormente fueron homogeneizadas y pasadas a través de un tamiz de 2 mm.

d) Plantas

Se tuvo una población de 150 plantas de maíz. Para la altura y diámetro de tallo se tomó la medida del total de plantas, pero para las evaluaciones de peso fresco y peso seco se utilizaron 6 plantas por tratamiento, teniendo un total de 60 plantas para todo el experimento.

3.4 Operacionalización de variables

Las dimensiones, indicadores y unidades de medida para cada variable, se indican en la Tabla 7.

Tabla 7

Operacionalización de las variables.

Variable	Dimensión	Indicadores	Unidades de medida
<i>Independientes</i>			
<i>Físico-químicas</i>			
Características físico-químicas y microbiológicas de los lodos producidos en las PTAR Copare y Magollo	Textura (Granulometría)	% Arena	-
		% Arcilla	
		% Limo	
	pH	<u>Nivel</u>	0 - 14
		Ácido	
		Neutro Alcalino	
	Conductividad eléctrica (C.E.)	<u>Nivel</u>	dS/m
		Bajo	
		Medio Alto	
	Materia orgánica	Nitrógeno (N)	<u>Nivel</u>
Fósforo (P)			
Potasio (K)			
Magnesio (Mg)			
Calcio (Ca)			
Sodio (Na)			
Elementos traza metálicos (ETM)	<i>Metales pesados</i>		mg/kg
	Al, Sb, As, Ba, Be, Cd,		
	Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Hg,		
	Mo, Ni, Ag, Pb, Se, Tl,		
	Th, U, V, Zn		
Compuestos microbianos	<i>Microbiológicos</i>		Número más probable de microorganismos/ g
	Coliformes totales		
	Coliformes fecales		
	<i>Escherichia coli</i> <i>Salmonella</i> sp.		

Sigue en la página 96...

...Continúa de la página 95

Generación total de lodos en las PTAR Copare y Magollo	PTAR Copare	Volumen de agua residual tratado	L/s
		Lodos producidos	kg/día
	PTAR Magollo	Volumen de agua residual tratado	L/s
		Lodos producidos	kg/día
Efecto de los lodos de las PTAR Copare y Magollo como abono en crecimiento de plantas de maíz (<i>Zea mays</i>)	Parámetros biométricos de planta de maíz	Altura de planta	cm
		Diámetro de tallo	cm
		Peso fresco	g
		Peso seco	g
		Materia seca	%
Dependiente			
Potencial agrícola de los lodos provenientes de las PTAR Copare y Magollo	Características de las aguas residuales en las PTAR Copare y Magollo	Características de las aguas residuales - entrada	ppm
		Características de las aguas residuales - salida	ppm
	Tratamiento de los lodos en las PTAR Copare y Magollo	Secado	-
		Alcalinización	-

Fuente: Elaboración propia

3.5 Ejecución de la tesis

3.5.1 Caracterización físico-química y microbiológica de los lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y de la tierra agrícola

Se realizaron análisis de los lodos y de la tierra agrícola, los parámetros se reunieron en tres grupos.

- **Parámetros agronómicos**

Estos parámetros fueron determinados en los lodos y la tierra agrícola, mediante un análisis de caracterización, llevado a cabo en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Fertilizantes (LASPAF) de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Los parámetros determinados se presentan en la Tabla 8.

- **Metales pesados**

Estos parámetros fueron determinados en los lodos y la tierra agrícola, mediante un análisis de Metales por ICP Masa, llevado a cabo en los laboratorios de SGS del Perú S.A.C. Los parámetros determinados se indican en la Tabla 9.

- **Parámetros microbiológicos**

Estos parámetros fueron determinados solo en lodos, mediante un análisis microbiológico, llevado a cabo en el Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología “Marino Tabusso” de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Los parámetros determinados se indican en la Tabla 10.

Tabla 8

Parámetros determinados y métodos seguidos en el análisis de caracterización.

Parámetro	Método analítico
Textura de suelo	% arena, limo y arcilla; método del hidrómetro
pH	Medida en el potenciómetro de la suspensión suelo: agua relación 1:1
Salinidad	Medida de la conductividad eléctrica del extracto acuoso en la relación suelo: agua 1:1
Calcáreo total (CaCO ₃)	Método de gaso-volumétrico utilizando calcímetro
Materia orgánica	Método Walkey y Black, oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio. % M.O. = %C x 1,724
Nitrógeno total	Método del micro-Kjeldhal
Fósforo disponible	Método de Olsen modificado, extracción con NaHCO ₃ = 0,5M, pH 8,5
Potasio disponible	Extracción con acetato de amonio (CH ₃ -COONH ₄)N, pH 7,0
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Saturación con acetato de amonio (CH ₃ -COONH ₄)N; pH 7,0
Ca ⁺² , Mg ⁺² , Na ⁺ , K ⁺ cambiables	Reemplazamiento con acetato de amonio (CH ₃ -COONH ₄)N; pH 7,0 cuantificación por fotometría de llama y/o absorción atómica
Al ⁺³ + H ⁺	Método de Yuan. Extracción con KCl, N

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF) – Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

Tabla 9

Parámetros determinados y métodos seguidos en el análisis de metales.

Parámetro	Método analítico
Al, Sb, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Hg, Mo, Ni, Ag, Pb, Se, Tl, Th, U, V, Zn	EPA 200.8: 1994 Rev 5.4 Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry

Fuente: SGS del Perú S.A.C. – Callao, Perú

Tabla 10

Parámetros determinados y métodos seguidos en el análisis microbiológico.

Parámetro	Método analítico
Coliformes fecales	International Commission on Microbiological Specifications for Foods. 1983. 2da Ed.
Coliformes totales	Vol 1 Part II, (Trad. 1988) Reimp. 2000.
<i>Escherichia coli</i>	Editorial Acribia
<i>Salmonella spp.</i>	Part 9260. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 21st Ed., American Public Health Association, Washington, DC. 2005.

Fuente: Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Marino Tabusso" – Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

3.5.2 Estimación y proyección de la generación total de lodos de las PTAR Copare y Magollo

Para la estimación, se utilizaron dos tipos de métodos: ratios de producción y las mediciones *in situ*. Se consideraron dos ratios de producción. Asimismo para las proyecciones se utilizaron las mismas realizadas por las entidades responsables del servicio de saneamiento.

Información de las plantas de tratamiento de aguas residuales de Tacna

Se revisó las características de las PTAR, como caudal de entrada, dimensiones, número de lagunas de estabilización, etc., así como las características del agua residual (pH, DBO, DQO, etc.). Se desarrolló el tema mediante la investigación de los antecedentes encontrados tanto en internet, bibliotecas e información otorgada por la EPS Tacna S.A., SUNASS, DIGESA, ALA, Gobierno Regional de Tacna y Municipalidad Provincial de Tacna.

Ratios de producción

- a) Un ratio de generación de lodos considera 0,087 toneladas de m.h. (materia húmeda) por habitante (Observatorio de Medio Ambiente, 2006; Generalitat Valenciana, 2008). Este ratio se utilizó para determinar la producción de lodos en base a la población ámbito de la EPS Tacna S.A. y que sus aguas servidas sean tratadas, para lo cual se tuvo que tener datos como: población total y población con servicio de alcantarillado.
- b) Otro ratio de producción de lodos indica la cuantificación en kilogramos de materia seca existente en el lodo por m³ de agua depurada que se trata, se expresa por tanto como “kg de M.S. /m³ A.D”. Se considera, un estándar la producción por habitante de 0,2 kg de materia seca por m³ de agua depurada (Municipio de las Palmas de Gran Canaria, 2012). Este ratio se utilizó para determinar la producción de lodos en base al volumen agua tratada en las PTAR, para lo cual se tuvo que tener datos como: volumen de agua volcada a la red, porcentaje de tratamiento de aguas residuales, volumen de agua tratada.

Mediciones de los lodos en los lechos de secado

Mediante esta labor se determinó el largo (m), ancho (m) y espesor (m) de las diferentes áreas en donde se depositaron los lodos para su deshidratación en cada PTAR. Asimismo se determinó la densidad de los lodos (t/m^3) mediante el método de masa/volumen para de esta manera obtener la producción de lodos.

3.5.3 Evaluación del efecto de los lodos en el crecimiento de plantas de maíz (ensayo)

El estudio se llevó a cabo en el vivero ubicado en las instalaciones del INPREX en Tacna, empleando bolsas de vivero de 17x18x4, las cuales se llenaron con 16 kg de sustrato y se aplicaron los tratamientos indicados en la Tabla 11.

Tabla 11

Tratamientos en estudio.

Tratamiento	Clave	Descripción
1	T ₁	0 t/ha (0 gr de lodo/bolsa)
2	T ₂	25 t/ha (33,33 g de lodo/bolsa) LC
3	T ₃	25 t/ha (33,33 g de lodo/bolsa) LM
4	T ₄	50 t/ha (66,67 g de lodo/bolsa) LC
5	T ₅	50 t/ha (66,67 g de lodo/bolsa) LM
6	T ₆	75 t/ha (100 g de lodo/bolsa) LC
7	T ₇	75 t/ha (100 g de lodo/bolsa) LM
8	T ₈	100 t/ha (133,34 g lodo/bolsa) LC
9	T ₉	100 t/ha (133,34 g lodo/bolsa) LM
10	T ₁₀	Fertilizante inorgánico

LC = Lodo procedente de la PTAR Copare; LM = Lodo procedente de la PTAR Magollo; Fuente: Elaboración propia.

1. Obtención y/o preparación de la mezcla suelo-lodo

PTAR

El suelo fue pasado a través de un tamiz de 2 mm, mezclado y homogenizado con la tasa de lodo usada en cada caso o con el fertilizante inorgánico. Se incubaron a su capacidad de campo durante dos semanas, y se llenaron posteriormente las bolsas.

2. Siembra y manejo

Posterior a la preparación e incubación se realizó la siembra empleando semillas de maíz (*Zea mays* L.) híbrido XB 8010. Se sembraron 5 semillas de maíz por bolsa a una profundidad de 2,5 cm. Luego, diariamente se adicionó agua para mantener la humedad del suelo, cercana a la capacidad de campo. Después de la emergencia, las plántulas fueron entresacadas dejando solamente 3 plantas por bolsa y se dejaron crecer por un período de 60 días.

3. Parámetros determinados

Los parámetros determinados y su frecuencia de evaluación, se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12

Parámetros determinados.

Parámetro	Unidad	Frecuencia
Suelo		
Características físico-químicas del suelo utilizado	físico- - -	Suelo inicial del experimento
Planta Indicadora		
Altura de planta	cm	A los 15, 30, 45 y 60 días
Diámetro de tallo	cm	después de la siembra
Peso fresco	g	A los 60 días después de la siembra
Peso seco	g	
Materia seca	%	

Fuente: Elaboración propia.

4. Determinación de los parámetros evaluados

- **Análisis físico – químico de la tierra agrícola**

Las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas de la Universidad Nacional Agraria La Molina, para su respectivo análisis de caracterización.

- **Altura de planta**

La evaluación de altura se realizó cada 15 días, donde se seleccionaron 5 plantas de cada repetición, 1 planta de cada bolsa, las cuales fueron identificadas para las posteriores evaluaciones. La medición se realizó desde la parte basal de la planta hasta el ápice de la última hoja emergida, midiendo en cm con una regla graduada.

- **Diámetro de tallo**

La evaluación de diámetro de tallo se realizó cada 15 días, donde se seleccionaron 5 plantas de cada repetición, 1 planta de cada bolsa, las cuales fueron identificadas para las posteriores evaluaciones. La medición se realizó a aproximadamente 5 cm desde la parte basal de la planta, midiendo en cm con un vernier o pie de rey.

- **Peso fresco, peso seco y materia seca**

Estos parámetros se determinaron al final del experimento, para lo cual se tomaron seis plantas de

cada tratamiento (dos por repetición). El procedimiento que se empleó para obtener el peso fresco y seco fue el siguiente:

- Se tomaron muestras frescas de la parte foliar y radicular, las cuales fueron pesadas y envueltas en bolsas de papel periódico, para así obtener el peso fresco de las muestras.
- Para obtener el peso seco, se llevaron las muestras a estufa a 60 °C durante 48 horas, hasta que adquirieran peso constante.
- Las muestras secas fueron pesadas, y por diferencia se calculó el porcentaje de humedad y materia seca.

Para la determinación de la materia seca (%), se empleó la siguiente fórmula:

$$\text{Materia seca (\%)} = \frac{\text{Peso seco (g)}}{\text{Peso fresco (g)}} \times 100$$

3.5.4 Revisión bibliográfica

Se realizó un análisis técnico-ambiental de la normativa vigente, respecto a las restricciones y requisitos de la aplicación de lodos en agrosistemas, y comparación con la legislación extranjera.

3.6 Tratamiento de datos (ensayo)

3.6.1 Diseño experimental

Para el análisis de los resultados, se adoptó el diseño experimental completamente al azar (DCA), con 3 repeticiones y 10 tratamientos, 15 unidades experimentales en cada tratamiento, con el siguiente modelo aditivo lineal:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \xi_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Respuesta del i-ésimo tratamiento en la j-ésimo observación

μ = Efecto de la media general.

T_i = Efecto de la i-ésimo tratamiento.

ξ_{ij} = Efecto aleatorio del error experimental en la j-ésima repetición a la cual se aplicó el i-ésimo tratamiento.

Para : $i = 1, 2, 3, \dots, 10$ tratamientos

$j = 1, 2, 3$ repeticiones

3.6.2 Esquema del análisis estadístico

El análisis estadístico de las diferentes características se realizó de acuerdo al análisis de variancia indicado en el Tabla 13, y la significación estadística se determinará por la prueba de Duncan al 5 % de probabilidad.

Tabla 13

Esquema del análisis de varianza a utilizarse para la evaluación de los datos del experimento.

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fcal
Tratamientos	(t-1)	$\sum Y_i^2/r - Y_{..}^2/rt$	Sc trat/GL t	CM t/CM e
Error experimental	(r-1)(t)	$\sum \sum Y_{ij}^2 - \sum Y_i^2/r$	SC exp/GL e	
Total	(rt-1)	$\sum \sum Y_{ij}^2 - Y_{..}^2/rt$		

Fuente: Elaboración propia.

3.6.3 Características del campo experimental

El campo experimental presentó la siguiente particularidad
(ver Figura 16 de Anexos para mayor detalle):

Tratamientos	10
Repeticiones	3
Plantas/tratamiento/repetición	5
Total plantas/tratamiento	15
Total plantas en el experimento	150
Área utilizada	50 m ²

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 De la caracterización físico-química y microbiológica de los lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y de la tierra agrícola

4.1.1 De los parámetros agronómicos

En la Tabla 14 se muestra los resultados de la caracterización físico-química del suelo agrícola y de los lodos residuales empleados.

El suelo utilizado fue de textura franco arenosa y según las tablas de interpretación de análisis de suelos (tablas 37, 38, 39 y 40) presentó las características siguientes: bajo contenido de materia orgánica (1,39%), fuertemente salino (6,28 dS/m) y pH ligeramente alcalino (7,48). También indican que la CIC (13,76) es baja, caracterizándolo como un suelo

pobre y que necesita aporte de materia orgánica; el nivel de fósforo (16,30 ppm) es alto; el nivel de carbonatos (0,7 %) es muy bajo; según el contenido de sodio cambiante (0,92 meq/100 g) se trata de un nivel normal, y como el suelo posee un contenido de potasio cambiante de 3,11 meq/100 g se trata de un suelo con nivel muy alto. El contenido de calcio (7,08 meq/100 g) es bajo, y el de magnesio (2,65 meq/100 g) es alto.

El lodo residual obtenido de la planta de tratamiento de Magollo (Lodo Magollo), se caracterizó por tener una textura arenosa, con 2,37 % de materia orgánica, conductividad eléctrica de 4,72 dS/m, 48,6 ppm de fósforo, 551 ppm de potasio y pH de 6,81. Por su parte el lodo residual obtenido de la planta de tratamiento de Copare (Lodo Copare), tuvo una textura arenosa, con 3,03 % de materia orgánica, conductividad eléctrica de 6,10 dS/m, 61,5 ppm de fósforo, 634 ppm de potasio y pH de 6,64.

Tabla 14

Análisis de caracterización de la tierra agrícola (INPREX) y de los lodos residuales.

Análisis	Tierra-INPREX	Lodo Copare	Lodo Magollo
pH (1:1)	7,48	6,64	6,81
C.E. (1:1) (dS/m)	6,28	6,10	4,72
CaCO ₃ (%)	0,70	3,60	3,00
M.O. (%)	1,39	3,03	2,37
N (%)	0,09	1,68	1,22
P (ppm)	16,30	61,50	48,60
K (ppm)	1144,00	634,00	551,00
Relación C/N	8,96*	8,53	13,14
CIC (meq/100 g)	13,76	29,12	21,60
<u>Análisis mecánico</u>			
Arena (%)	53,00	91,00	89,00
Limo (%)	36,00	6,00	8,00
Arcilla (%)	11,00	3,00	3,00
Clase textural	Franco arenoso	Arena	Arena
<u>Cationes cambiables</u>			
Ca ⁺² (meq/100 g)	7,08	20,42	14,46
Mg ⁺² (meq/100 g)	2,65	4,45	4,10
K ⁺ (meq/100 g)	3,11	1,66	1,35
Na ⁺ (meq/100 g)	0,92	2,59	1,69
Al ⁺³ + H ⁺ (meq/100 g)	0,00	0,00	0,00
Suma de cationes	13,76	29,12	21,60
Suma de bases	13,76	29,12	21,60
Saturación de bases (%)	100,00	100,00	100,00

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF) - Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

* Dato estimado; producto de dividir el porcentaje de carbono orgánico estimado y el porcentaje de nitrógeno; Carbono orgánico estimado: se consideró que la materia orgánica contiene 58 % de carbono orgánico (FASSBENDER y BORNEMISZA, 1994).

4.1.2 De los metales pesados

En la Tabla 15 se muestran los resultados del contenido de metales de los lodos y la tierra agrícola. Los metales con mayor contenido en los lodos fueron: aluminio, zinc, cobre, manganeso, plomo, bario y arsénico; para el caso de la tierra agrícola, los metales que se presentaron en mayor proporción fueron el aluminio, manganeso, zinc, bario y arsénico; en el orden mencionado para ambos casos.

De los metales clasificados como los que no tienen función biológica (Cd, Hg, Pb, Sb, Tl), estos se encontraron en cantidades relativamente bajas en los lodos y en el suelo, a excepción del plomo que se encontró en una proporción alta respecto a los otros metales para ambos casos, destacándose su contenido sobre todo en los lodos.

Asimismo, se puede notar un contenido diferenciado en el mercurio, antimonio, cadmio, cobre, molibdeno, plata, plomo y zinc, teniendo ambos de los lodos una cantidad mucho mayor en estos metales que la tierra agrícola. Por lo contrario, la tierra agrícola presentó contenidos significativamente mayores en los metales manganeso y thorio.

Tabla 15

Contenido de metales pesados (Metales por ICP Masa) de los lodos de Copare, Magollo y de la tierra agrícola (Informe de Ensayo con valor oficial - MA1303520, MA1303522, MA1303523 correspondientemente).

Metal pesado	Lodo Copare	Lodo Magollo	Tierra agrícola (INPREX-Tacna)
Aluminio (mg/kg)	8922,0000	6317,7000	7874,4000
Antimonio (mg/kg)	4,1380	3,1300	0,6470
Arsénico (mg/kg)	88,6100	59,0400	50,6000
Bario (mg/kg)	135,7400	94,2600	94,5900
Berilio (mg/kg)	0,8530	0,6380	0,3000
Cadmio (mg/kg)	4,4810	2,5770	0,5470
Cobalto (mg/kg)	5,3000	4,8000	8,2260
Cobre (mg/kg)	404,8200	251,7300	36,8400
Cromo (mg/kg)	40,2400	21,7000	13,1900
Hierro (mg/kg)*	13,6270	11,9530	17,3790
Manganeso (mg/kg)	269,3100	198,4800	520,7500
Mercurio (mg/kg)	3,4864	1,9547	0,2313
Molibdeno (mg/kg)	8,4300	8,9600	1,6600
Níquel (mg/kg)	19,0100	16,5100	13,4700
Plata (mg/kg)	15,1300	11,1200	1,7460
Plomo (mg/kg)	311,0700	190,1300	21,7000
Selenio (mg/kg)	1,6700	0,6300	1,2000
Talio (mg/kg)	0,4739	0,2867	0,2979
Thorio (mg/kg)	0,2260	0,1360	3,0640
Uranio (mg/kg)	1,9655	1,8519	0,7654
Vanadio (mg/kg)	50,0000	34,0000	30,0000
Zinc (mg/kg)	1252,0500	870,2500	107,2000

(*) El método indicado no ha sido acreditado por el INDECOPI-SNA, para la matriz en mención.

Fuente: SGS del Perú S.A.C. – Callao, Perú (Laboratorio de ensayo acreditado por el organismo peruano de acreditación INDECOPI-SNA con registro N° LE-002).

4.1.3 De los parámetros microbiológicos

En el análisis microbiológico de los lodos de Copare y Magollo (Tabla 16), podemos apreciar que el lodo procedente de la PTAR Copare tiene presencia de coliformes totales y fecales, mientras que el lodo procedente de la PTAR Magollo, mostró ausencia en todo los parámetro microbiológicos evaluados.

Tabla 16

Análisis microbiológico de las muestras de lodo residual de Copare y Magollo.

Análisis microbiológico	Lodo Copare	Lodo Magollo
Enumeración de coliformes totales (NMP/g)	11×10^2	< 3
Enumeración de coliformes fecales (NMP/g)	11×10^2	< 3
Enumeración de <i>Escherichia coli</i> (NMP/g)	< 3	< 3
Detección de <i>Salmonella</i> sp. en 25 g	Ausencia	Ausencia

(*) El valor <3 indica ausencia de microorganismos en ensayo.

Fuente: Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Marino Tabusso" - Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

4.2 De la estimación y proyección de la generación total de lodos de las PTAR Copare y Magollo

4.2.1 En base a la población

Según la metodología el ratio de producción que se manejó para estimar la generación de lodos es de 0,087 toneladas (87

kg) de materia húmeda por habitante. Los resultados se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17

Estimación y proyección de la generación de lodos en base a la población con servicio de alcantarillado para el período 2012 - 2020.

Año	Total de habitantes *	Población servida *		Generación potencial de lodos (materia húmeda) (t)	Generación de lodos por cobertura de servicio (materia húmeda) (t)	Generación de lodos por cobertura de servicio (20 % de materia seca) (t)
		%	Habitantes			
2012	287 450	87,7	251 954	25 008,15	21 920,00	4384,00
2013	293 532	87,0	255 373	25 537,28	22 217,45	4443,49
2014	299 743	87,0	260 776	26 077,64	22 687,51	4537,50
2015	305 978	87,0	266 200	26 620,09	23 159,40	4631,88
2016	312 235	87,0	271 645	27 164,45	23 633,12	4726,62
2017	318 516	87,0	277 109	27 710,89	24 108,48	4821,70
2018	324 822	87,0	282 595	28 259,51	24 585,77	4917,15
2019	331 150	96,0	317 904	28 810,05	27 657,65	5531,53
2020	337 502	96,0	324 002	29 362,67	28 188,17	5637,63

Fuente: Cálculos de generación y estimación de lodos en base a los datos de la EPS Tacna S.A.

(*) Proyección de demanda de alcantarillado - EPS Tacna S.A. (2012b) - Plan maestro optimizado actualizado 2013-2043.

4.2.2 En base al volumen de agua tratada en las PTAR

Según la metodología, para estimar la generación de lodos, se consideró un estándar por habitante de 0,2 kg de materia

seca por m³ de agua depurada. Los resultados se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18

Estimación y proyección de la generación de lodos en base a la cantidad de aguas residuales tratadas para el período 2013 - 2020.

Año	Demanda	Volumen volcado a la red (m ³)	Agua residual tratada		Generación de lodos (materia seca) (t)
	de tratamiento de aguas residuales* (L/s)		% de tratamiento	Volumen (m ³)	
2011	-	11 656 621**	89,28**	10 406 880**	2081,38
2012	-	11 656 621	90,62	10 563 136,70	2112,63
2013	745	11 656 621	91,98	10 721 583,75	2144,32
2014	775	11 656 621	93,36	10 882 407,50	2176,48
2015	806	11 656 621	94,76	11 045 643,62	2209,13
2016	838	11 656 621	96,18	11 211 328,27	2242,27
2017	872	11 656 621	97,62	11 379 498,19	2275,90
2018	906	11 656 621	99,09	11 550 190,67	2310,04
2019	942	11 656 621	100,00	11 656 621,00	2331,32
2020	979	11 656 621	100,00	11 656 621,00	2331,32

Fuente: Cálculos de generación y estimación de lodos en base a los datos de la EPS Tacna S.A y SUNASS. (*) Proyección de demanda de alcantarillado - EPS Tacna S.A. (2012b) - Plan maestro optimizado actualizado 2013-2043; (**) Datos de SUNASS (2012). Las EPS y su desarrollo; % de tratamiento proyectado según Tabla 32 de Anexos.

4.2.3 En base a las mediciones de los lodos en los lechos de secado de las PTAR

Producto de las mediciones realizadas de los lodos en los campos de secado, se obtuvo la cantidad de lodos dispuestos en ambas PTAR. Los resultados se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19

Generación total de lodos de las PTAR Copare y Magollo (mediciones en enero de 2013).

PTAR	Total de lagunas*	Lagunas limpiadas*	Volumen de lodos (m ³)**	Densidad del lodo (t/m ³)	Estimación parcial (t)***	Estimación total (t)****
Copare	4	2	8848,97	0,67	5857,51	11 715,02
Magollo	12	4	9915,86	0,68	6729,56	20 188,68
Total	16	6	18 764,82	-	12 617,07	31 903,70

Fuente: (*) EPS TACNA (2012b) en Anexos; (**) Cálculos de generación de lodos en base a los datos de la Tabla 33 y 34 de Anexos (correspondiente al volumen de lodos removido de la limpieza de lagunas, lodos en los lechos de secado); (***) Estimación parcial = Volumen de lodos (m³)*Densidad*Lagunas limpiadas; (****) Estimación total = Estimación parcial*factor, Copare (factor = 2), Magollo (factor = 3), factor = Total lagunas/lagunas limpiadas.

4.3 De la evaluación del efecto de los lodos en el crecimiento de plantas de maíz (ensayo)

4.3.1 De la altura de planta

El análisis de varianza (Tabla 20) nos indica que no existen diferencias significativas para la fuente de variación “Tratamientos”, es decir, ningún tratamiento demostró ser estadísticamente superior a los demás. Asimismo, el coeficiente de variabilidad nos indica un estimado aceptable para este carácter.

Tabla 20

Análisis de varianza para el carácter altura de planta de maíz híbrido XB 8010 a los 60 días después de la siembra.

Fuente de variación	G.L.	SC	CM	Fcal	Sign.
Tratamientos	9	659,59	73,29	0,92	NS
Error experimental	20	1597,89	79,89		
Total	29	2257,47			

C.V. (%) = 20,06

NS = No significativo

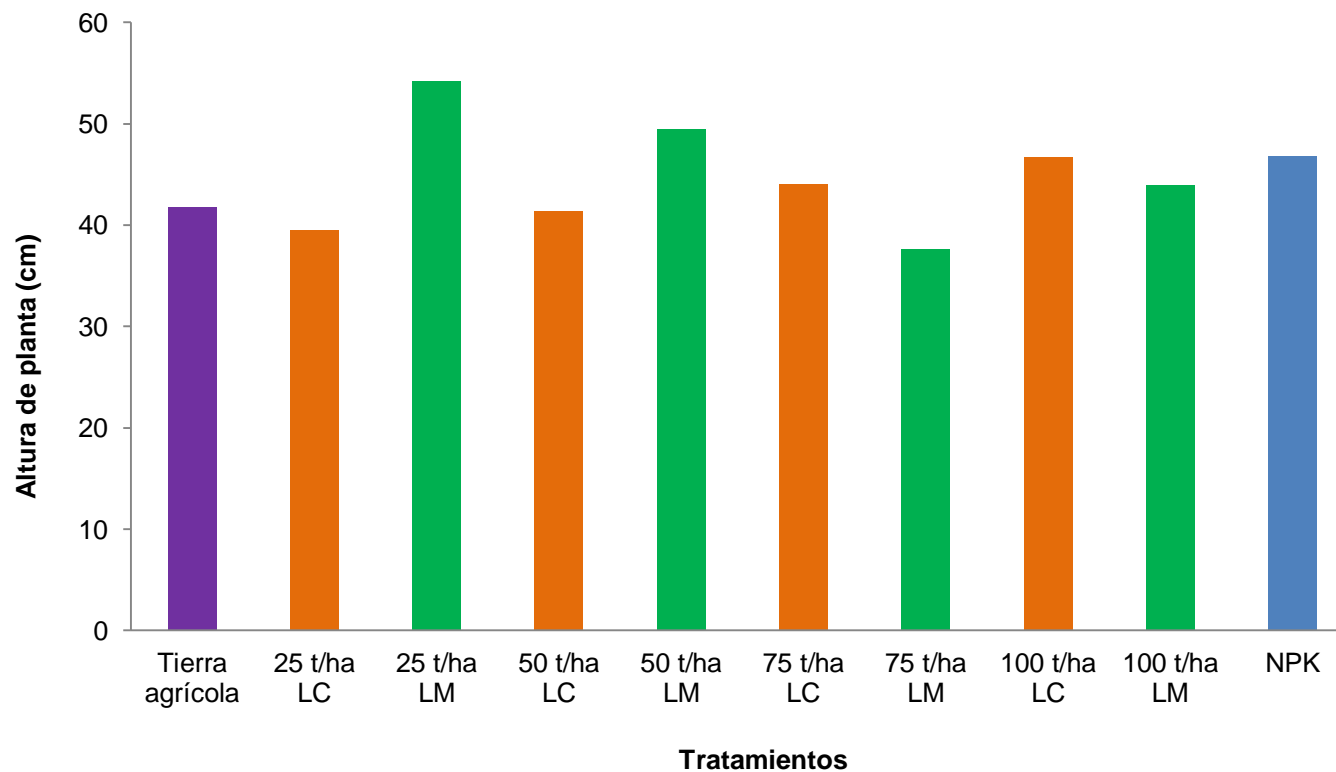
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 1, tenemos el efecto de los lodos en la altura de plantas de maíz XB 8010 a los 60 días, donde puede observarse que para el caso de los lodos provenientes de la PTAR Copare (LC), se obtuvo una mayor altura a medida que se aumentó la dosis de lodo en el suelo. Para el lodo de la PTAR Magollo (LM), fue casi lo contrario a no ser por la dosis de 100 t/ha que obtuvo un mayor promedio de altura que la de 75 t/ha. Por otro lado, el testigo de solo tierra agrícola (T_1), fue numéricamente superior (todos los tratamientos obtuvieron resultados estadísticos similares, Tabla 36 de Anexos) a algunos de los tratamientos con dosis de lodos, como lodo Copare 25 t/ha y 50 t/ha (T_2 y T_4 respectivamente) y lodo Magollo 75 t/ha (T_7). El testigo NPK (T_{10}), solo fue superado por los tratamientos T_3 y T_5 correspondientes a 25 t/ha y 50 t/ha de lodo Magollo respectivamente.

Por otro lado, en la Figura 2, tenemos las curvas de crecimiento para altura de planta, y cada una con sus ecuaciones de línea de tendencia tipo polinómica para cada tratamiento y sus correspondientes coeficientes de determinación lineal (R^2), que en todos los casos estuvieron

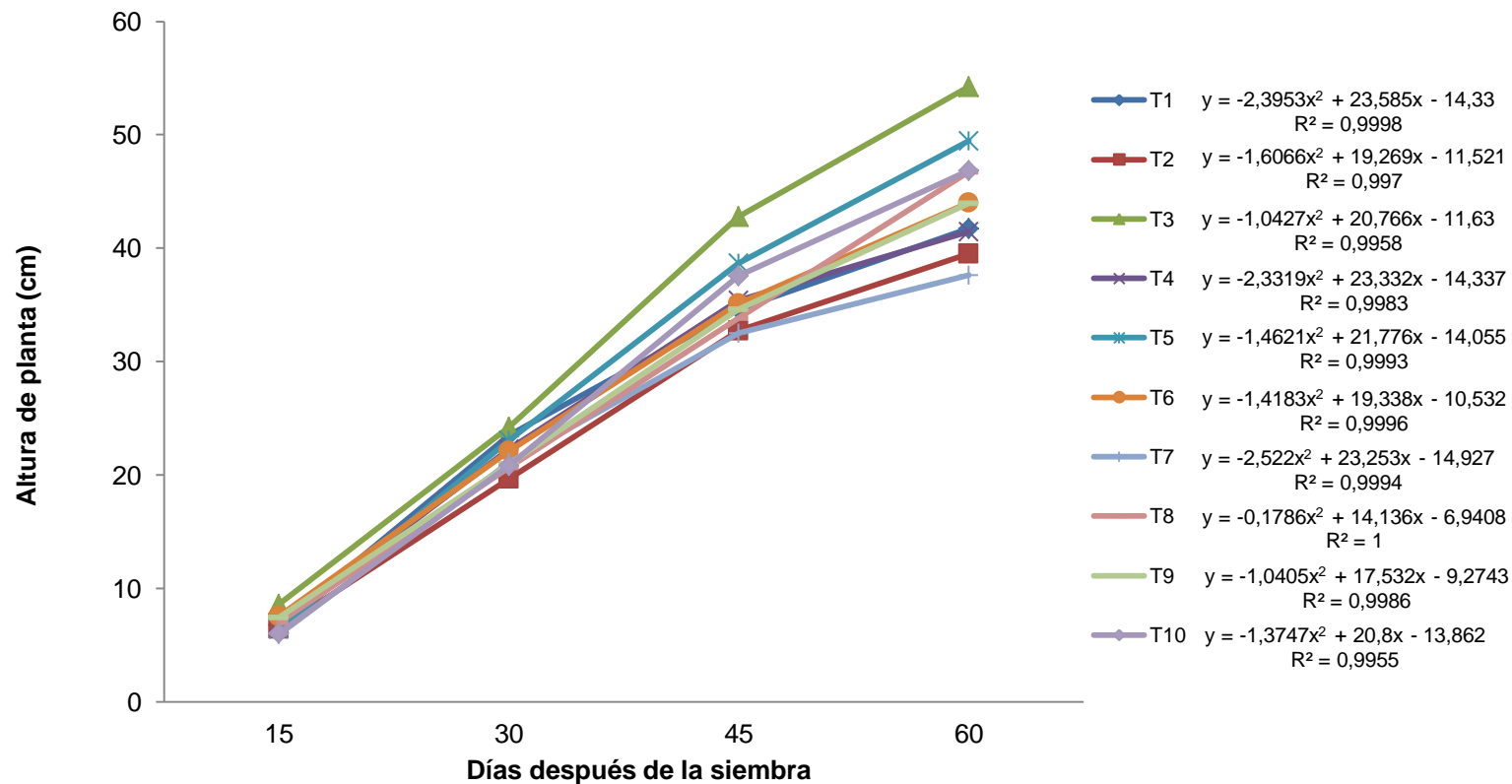
cercanos a la unidad, por lo tanto el ajuste lineal fue muy bueno. Asimismo, se puede observar que tanto para la evaluación a los 15 y 30 días después de la siembra, la altura de planta en los tratamientos fue similar; sin embargo, a partir de los 45 días después de la siembra se comienza a observar ligeras diferencias, más notorias aún en la evaluación a los 60 días después de la siembra.

Tanto en la Figura 1 como en la Figura 2, se puede notar que los valores más altos en altura de planta se alcanzaron con los tratamientos T_3 y T_5 que corresponden a 25 t/ha y 50 t/ha de lodo Magollo respectivamente, sin embargo esto no representó superioridad estadística, tal y como se había indicado anteriormente.



LC = Lodo Copare; LM = Lodo Magollo; T₁=Tierra agrícola; T₂=25 t/ha LC; T₃=25 t/ha LM; T₄=50 t/ha LC; T₅=50 t/ha LM; T₆=75 t/ha LC; T₇=75 t/ha LM; T₈=100 t/ha LC; T₉=100 t/ha LM; T₁₀=NPK. (Fuente: Tabla 35)

Figura 1. Efecto de las dosis de lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y de los testigos (tierra agrícola y NPK) en la altura de plantas de maíz híbrido XB 8010 (60 días después de la siembra).



T₁=Tierra agrícola; T₂=25 t/ha LC; T₃=25 t/ha LM; T₄=50 t/ha LC; T₅=50 t/ha LM; T₆=75 t/ha LC; T₇=75 t/ha LM; T₈=100 t/ha LC; T₉=100 t/ha LM;

T₁₀=NPK. (Fuente: Tabla 35)

Figura 2. Curva de crecimiento de la altura de plantas de maíz híbrido XB 8010 para las dosis de lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y comparación con los tratamientos testigos (T₁ y T₁₀).

4.3.2 Del diámetro de tallo

El análisis de varianza (Tabla 21) nos indica que no existen diferencias significativas para la fuente de variación “Tratamientos”, es decir, ningún tratamiento demostró ser estadísticamente superior a los demás. Asimismo, el coeficiente de variabilidad nos indica un estimado aceptable para este carácter.

Tabla 21

Análisis de varianza para el carácter diámetro de tallo de plantas de maíz híbrido XB 8010 a los 60 días después de la siembra.

Fuente de variación	G.L.	SC	CM	Fcal	Sign.
Tratamiento	9	30,37	3,37	1,25	NS
Error experimental	20	54,17	2,71		
Total	29	84,54			

C.V. (%) = 20,35

NS = No significativo

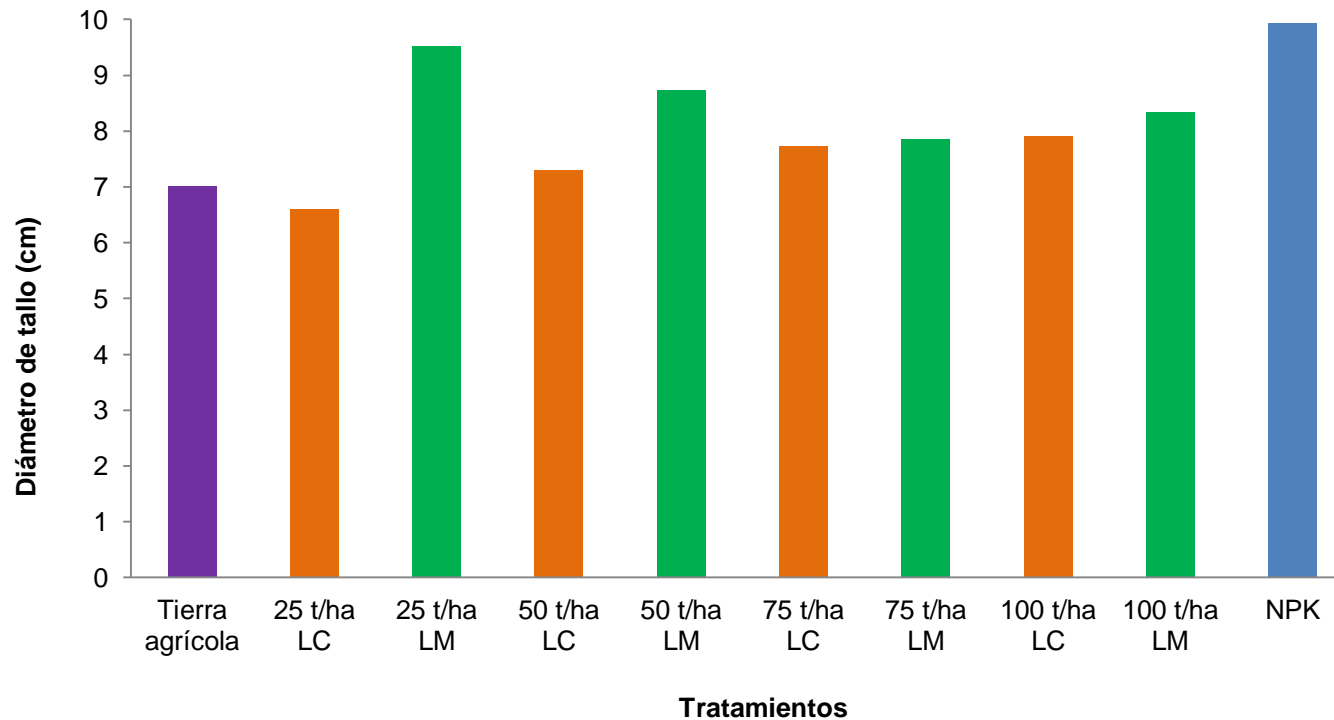
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3, tenemos el efecto de los lodos en el diámetro de tallo de maíz XB 8010 a los 60 días, donde puede observarse que para el caso de los lodos provenientes de la

PTAR Copare (LC), se obtuvo una mayor diámetro a medida que se aumentó la dosis de lodo en el suelo. Para el lodo de la PTAR Magollo (LM), fue casi lo contrario a no ser por la dosis de 100 t/ha que obtuvo un mayor promedio de altura que la de 75 t/ha. Por otro lado, el testigo de solo tierra agrícola (T_1), fue numéricamente superior (todos los tratamientos obtuvieron resultados estadísticos similares, Tabla 35 de Anexos) solo al tratamiento T_2 (Lodo Copare 25 t/ha). En cuanto al testigo NPK (T_{10}), este alcanzó alturas mayores a todos los demás tratamientos.

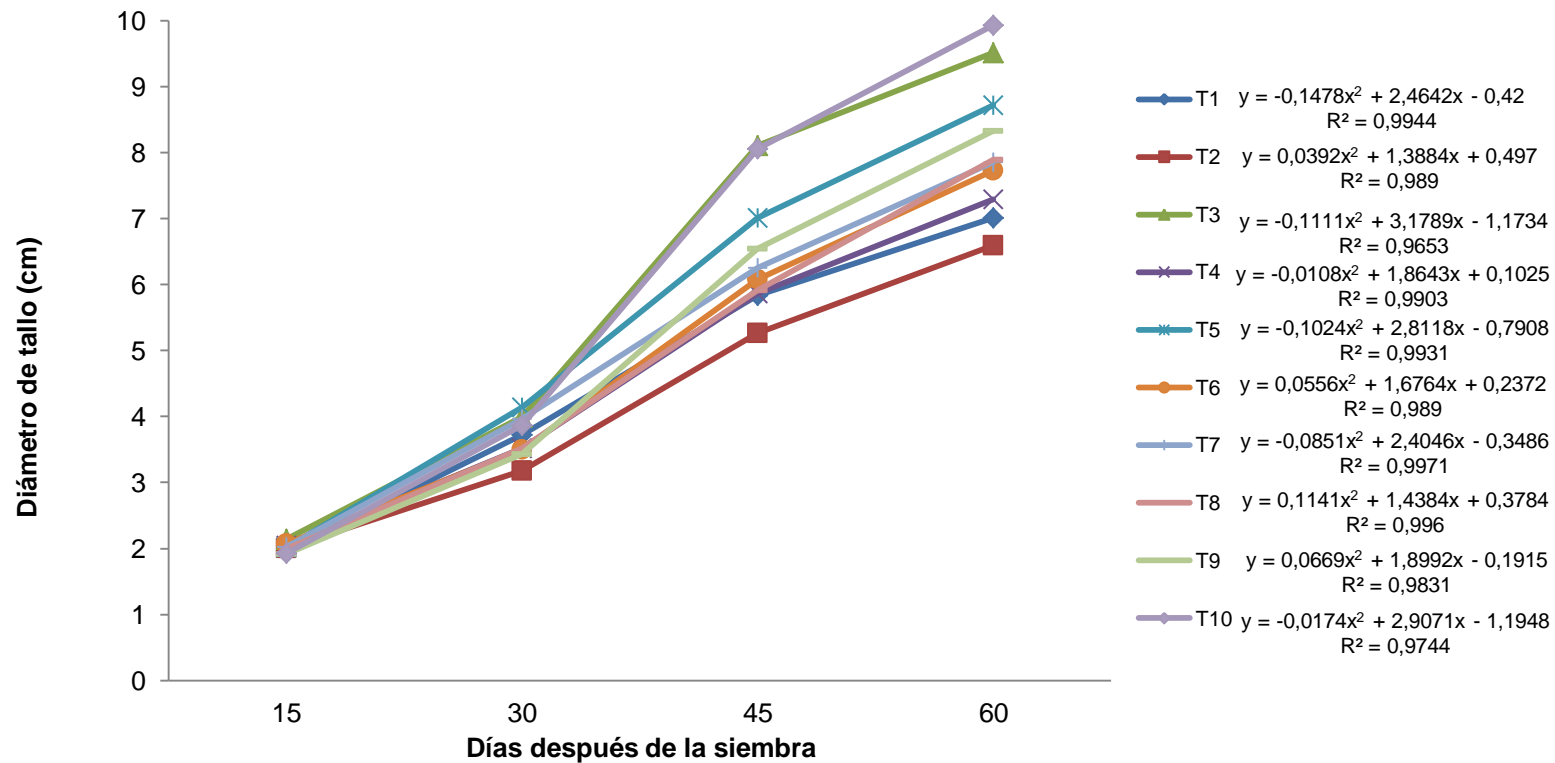
Por otro lado, en las Figura 4, tenemos las curvas de crecimiento para diámetro de tallo, y cada una con sus ecuaciones de línea de tendencia tipo polinómica para cada tratamiento y sus correspondientes coeficientes de determinación lineal (R^2), que igual que para altura de planta (Figura 2), todos los casos estuvieron cercanos a la unidad, por lo tanto el ajuste lineal fue muy bueno. Asimismo, se puede observar que tanto para la evaluación a los 15 y 30 días después de la siembra, el diámetro de tallo en los tratamientos fue similar, sin embargo a partir de los 45 días

después de la siembra se comienza a observar ligeras diferencias, más notorias aún en la evaluación a los 60 días después de la siembra. Tanto en la Figura 3 como en la Figura 4, se puede notar que los valores más altos en diámetro de tallo se alcanzaron con los tratamientos T_{10} y T_3 que corresponden a NPK y 25 t/ha de lodo Magollo respectivamente, sin embargo esto no representó superioridad estadística, tal y como se había indicado anteriormente.



LC = Lodo Copare; LM = Lodo Magollo; T₁=Tierra agrícola; T₂=25 t/ha LC; T₃=25 t/ha LM; T₄=50 t/ha LC; T₅=50 t/ha LM; T₆=75 t/ha LC; T₇=75 t/ha LM; T₈=100 t/ha LC; T₉=100 t/ha LM; T₁₀=NPK. (Fuente: Tabla 35)

Figura 3. Efecto de las dosis de lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y de los testigos (tierra agrícola y NPK) en el diámetro de tallo de plantas de maíz híbrido XB 8010 (60 días después de la siembra).



T₁=Tierra agrícola; T₂=25 t/ha LC; T₃=25 t/ha LM; T₄=50 t/ha LC; T₅=50 t/ha LM; T₆=75 t/ha LC; T₇=75 t/ha LM; T₈=100 t/ha LC; T₉=100 t/ha LM; T₁₀=NPK. (Fuente: Tabla 35)

Figura 4. Curva de crecimiento del diámetro de tallo de plantas de maíz híbrido XB 8010 para las dosis de lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y comparación con los tratamientos testigos (T₁ y T₁₀).

4.3.3 Del peso fresco, peso seco y materia seca

El análisis de varianza para el carácter peso fresco de plantas de maíz (Tabla 22) nos indica que existen diferencias altamente significativas para la fuente de variación “Tratamientos”, es decir, por lo menos uno de los tratamientos demostró ser estadísticamente superior a los demás. Asimismo, el coeficiente de variabilidad nos indica un estimado aceptable para este carácter.

Tabla 22

Análisis de varianza para el carácter peso fresco de plantas de maíz híbrido XB 8010 a los 60 días después de la siembra.

Fuente de variación	G.L.	SC	CM	Fcal	Sign.
Tratamiento	9	2526,46	280,72	4,32	**
Error experimental	20	1299,84	64,99		
Total	29	3826,30			

C.V. (%) = 20,66

NS = No significativo

Fuente: Elaboración propia.

Como la fuente de variación “Tratamientos”, resultó altamente significativa, se requirió realizar una prueba de comparación

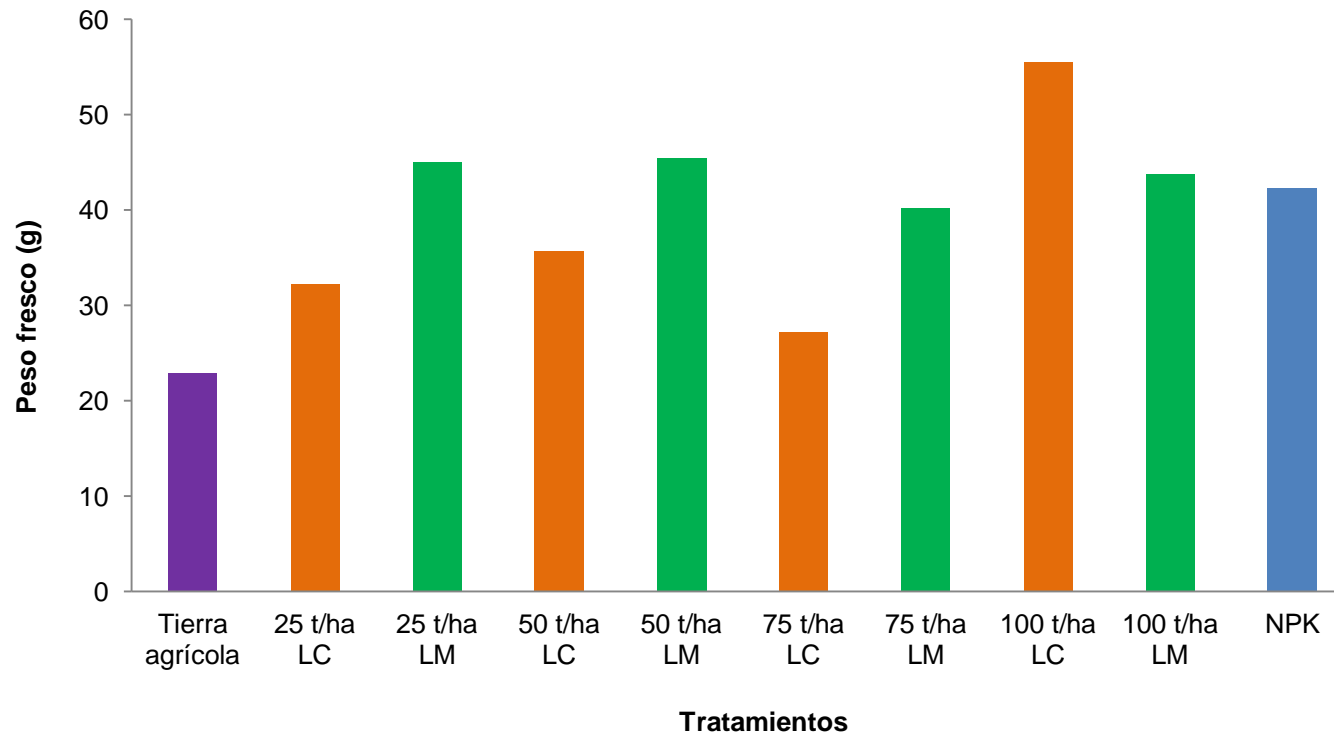
de medias, para determinar que tratamiento o tratamientos mostraron superioridad estadística respecto a los otros. En el presente trabajo se utilizó la Prueba de Duncan, para determinar tales diferencias, los resultados se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23

Comparación de medias (Duncan, $\alpha = 0.05$) para el parámetro peso fresco de plantas de maíz XB 8010 a los 60 días después de la siembra.

Lodo				
Tratamiento	PTAR	Dosis (t/ha)	Promedio (g)	Significación*
T ₈	Copare	100	55,50	a
T ₅	Magollo	50	45,50	a b
T ₃	Magollo	25	45,00	a b
T ₉	Magollo	100	43,78	a b
T ₁₀	NPK**	0	42,29	a b c
T ₇	Magollo	75	40,17	a b c
T ₄	Copare	50	35,67	b c d
T ₂	Copare	25	32,25	b c d
T ₆	Copare	75	25,17	c d
T ₁	Tierra agrícola**	0	22,88	d

Fuente: Elaboración propia. (*) Tratamientos indicados con la misma letra no difieren significativamente entre sí; (**) Los tratamientos T₁ y T₁₀, corresponden a los testigos y no son de procedencia de alguna PTAR.



LC = Lodo Copare; LM = Lodo Magollo; T₁=Tierra agrícola; T₂=25 t/ha LC; T₃=25 t/ha LM; T₄=50 t/ha LC; T₅=50 t/ha LM; T₆=75 t/ha LC; T₇=75 t/ha LM; T₈=100 t/ha LC; T₉=100 t/ha LM; T₁₀=NPK. (Fuente: Tabla 36)

Figura 5. Efecto de las dosis de lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y de los testigos (tierra agrícola y NPK) en el peso fresco de plantas de maíz híbrido XB 8010 (60 días después de la siembra).

Para el caso del peso seco, se presenta su respectivo análisis de varianza (Tabla 24), que nos indica que existen diferencias altamente significativas para la fuente de variación “Tratamientos”, es decir, por lo menos uno de los tratamientos demostró ser estadísticamente superior a los demás. Asimismo, el coeficiente de variabilidad nos indica un estimado aceptable para este carácter.

Tabla 24

Análisis de varianza para el carácter peso seco de plantas de maíz híbrido XB 8010 a los 60 días después de la siembra.

Fuente de variación	G.L.	SC	CM	Fcal	Sign.
Tratamiento	9	1197,26	133,03	14,45	**
Error experimental	20	184,09	9,20		
Total	29	1381,35			

C.V. (%) = 21,05

NS = No significativo

Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera que para el peso fresco, se requirió realizar una prueba de comparación de medias, para determinar que tratamiento o tratamientos mostraron

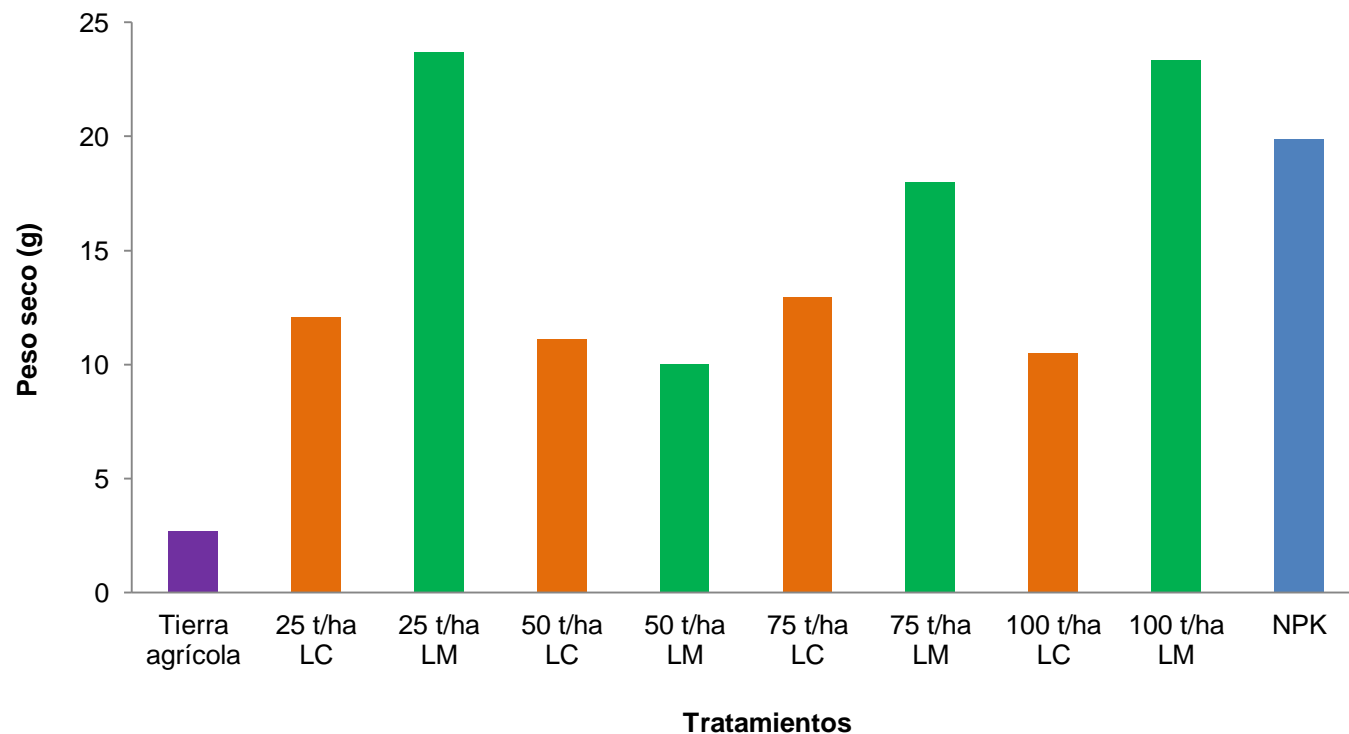
superioridad estadística respecto a los otros, los resultados se presentan en la Tabla 25.

Tabla 25

Comparación de medias (Duncan, $\alpha = 0.05$) para el parámetro peso seco de plantas de maíz XB 8010 a los 60 días después de la siembra.

Lodo				
Tratamiento	PTAR		Promedio (g)	Significación
		Dosis (t/ha)		
T ₃	Magollo	25	23,67	a
T ₉	Magollo	100	23,34	a b
T ₁₀	NPK**	0	19,85	a b
T ₇	Magollo	75	18,00	b c
T ₆	Copare	75	12,92	c
T ₂	Copare	25	12,05	d
T ₄	Copare	50	11,11	d
T ₈	Copare	100	10,50	d
T ₅	Magollo	50	10,00	d
T ₁	Tierra agrícola**	0	2,67	e

Fuente: Elaboración propia. (*) Tratamientos indicados con la misma letra no difieren significativamente entre sí; (**) Los tratamientos T₁ y T₁₀, corresponden a los testigos y no son de procedencia de alguna PTAR.



LC = Lodo Copare; LM = Lodo Magollo; T₁=Tierra agrícola; T₂=25 t/ha LC; T₃=25 t/ha LM; T₄=50 t/ha LC; T₅=50 t/ha LM; T₆=75 t/ha LC; T₇=75 t/ha LM; T₈=100 t/ha LC; T₉=100 t/ha LM; T₁₀=NPK. (Fuente: Tabla 36)

Figura 6. Efecto de las dosis de lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y de los testigos (tierra agrícola y NPK) en el peso seco de plantas de maíz híbrido XB 8010 (60 días después de la siembra).

Producto de la relación entre peso seco y peso fresco, tenemos el porcentaje de materia seca, del cual se presenta su correspondiente análisis de varianza (Tabla 26), que nos indica que existen diferencias altamente significativas para la fuente de variación “Tratamientos”, es decir, por lo menos uno de los tratamientos demostró ser estadísticamente superior a los demás. Asimismo, el coeficiente de variabilidad nos indica un estimado heterogéneo, pero aceptable para este carácter.

Tabla 26

Análisis de varianza para el carácter porcentaje de materia seca de plantas de maíz híbrido XB 8010 a los 60 días después de la siembra.

Fuente de variación	G.L.	SC	CM	Fcal	Sign.
Tratamiento	9	5967,14	633,02	7,51	**
Error experimental	20	1766,05	88,30		
Total	29	7733,20			

C.V. (%) = 25,12

NS = No significativo

Fuente: Elaboración propia.

De la misma forma se requirió realizar una prueba de comparación de medias, para determinar que tratamiento o

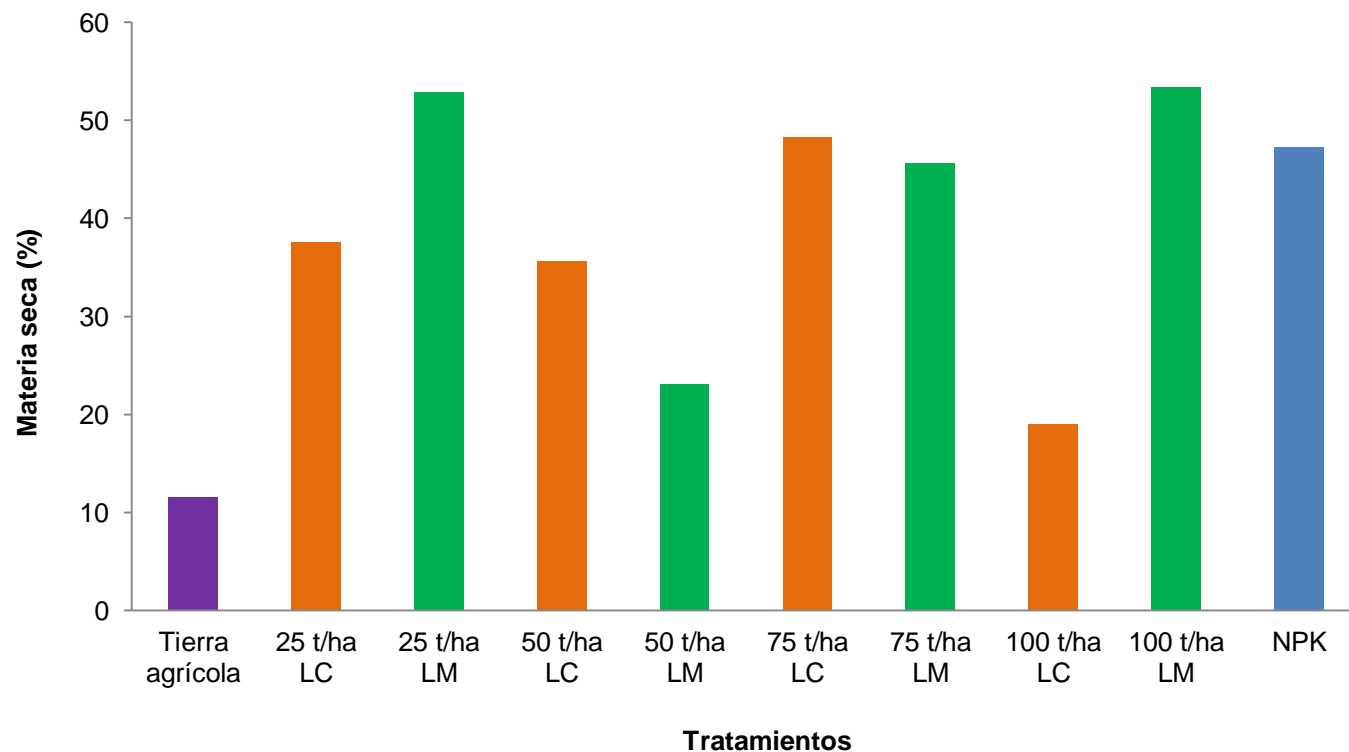
tratamientos mostraron superioridad estadística respecto a los otros, los resultados se presentan en el Tabla 27.

Tabla 27

Comparación de medias (Duncan, $\alpha = 0.05$) para el parámetro porcentaje de materia seca de plantas de maíz XB 8010 a los 60 días después de la siembra.

Lodo				
Tratamiento	PTAR	Dosis (t/ha)	Promedio (%)	Significación
T ₉	Magollo	100	53,30	a
T ₃	Magollo	25	52,87	a
T ₆	Copare	75	48,23	a
T ₁₀	NPK**	0	47,25	a
T ₇	Magollo	75	45,61	a
T ₂	Copare	25	37,50	a b
T ₄	Copare	50	35,65	a b c
T ₅	Magollo	50	23,03	b c d
T ₈	Copare	100	19,05	c d
T ₁	Tierra agrícola**	0	11,54	d

Fuente: Elaboración propia. (*) Tratamientos indicados con la misma letra no difieren significativamente entre sí; (**) Los tratamientos T₁ y T₁₀, corresponden a los testigos y no son de procedencia de alguna PTAR.



LC = Lodo Copare; LM = Lodo Magollo; T₁=Tierra agrícola; T₂=25 t/ha LC; T₃=25 t/ha LM; T₄=50 t/ha LC; T₅=50 t/ha LM; T₆=75 t/ha LC; T₇=75 t/ha LM; T₈=100 t/ha LC; T₉=100 t/ha LM; T₁₀=NPK. (Fuente: Tabla 36)

Figura 7. Efecto de las dosis de lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y de los testigos (tierra agrícola y NPK) en el porcentaje de materia seca de plantas de maíz híbrido XB 8010 (60 días después de la siembra).

Como se puede apreciar en la Tabla 23 y Figura 5, el tratamiento T₈ (Lodo Copare 100 t/ha) fue el que obtuvo el mejor promedio en peso fresco, sin embargo no se diferenció estadísticamente de los tratamientos T₅ (Lodo Magollo 50 t/ha), T₃ (Lodo Magollo 25 t/ha), T₉ (Lodo Magollo 100 t/ha), T₁₀ (NPK) y T₇ (Lodo Magollo 75 t/ha); aunque sí mostró superioridad estadística ante los tratamientos T₄ (Lodo Copare 50 t/ha), T₂ (Lodo Copare 25 t/ha), T₆ (Lodo Copare 75 t/ha) y T₁ (Tierra agrícola).

Para peso seco, en la Tabla 25 y Figura 6 se observa que el tratamiento T₃ (Lodo Magollo 25 t/ha) fue el que obtuvo el mejor promedio, pero no se diferenció estadísticamente de los tratamientos T₉ (Lodo Magollo 100 t/ha) ni T₁₀ (NPK), aunque sí de todos los demás; por otro lado el tratamiento T₁ (Tierra agrícola) fue el que obtuvo el menor valor en peso seco, siendo todos los tratamientos superiores estadísticamente a él.

Finalmente, en la Tabla 27 y Figura 7 se aprecia que el tratamiento T₉ (Lodo Magollo 100 t/ha) obtuvo el mejor promedio en porcentaje de materia seca, pero solo se diferenció estadísticamente de los tratamientos T₅ (Lodo Magollo 50 t/ha), T₈ (Lodo Copare 100 t/ha) y T₁ (Tierra agrícola), quienes no mostraron diferencia estadística entre ellos.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.1 De la caracterización físico-química y microbiológica de los lodos residuales de las PTAR Copare y Magollo y de la tierra agrícola

5.1.1 De los parámetros agronómicos

De acuerdo a las características presentadas en la Tabla 14, respecto a la Tierra agrícola, indican que lo hacen apto para la aplicación de lodos según la Norma OS.090 del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2011). Respecto al pH clasificado como moderadamente alcalino (7,48), Dorrnsoro *et al.* (2002) indican que se espera que los metales pesados que contienen los lodos residuales pasen a formas no solubles, dejándolos fuera de la solución del suelo y limitando su disponibilidad para ser absorbidos por las raíces de las plantas. Esta característica de los suelos es muy conveniente para la aplicación de lodos residuales debido a que se puede obtener la ventaja de la aplicación de estos materiales sin el

riesgo de contaminar severamente los suelos con metales pesados.

En la misma Tabla 14, se indica que los porcentajes de nitrógeno y materia orgánica en la tierra agrícola son considerados como pobres. Este resultado era previsible debido a las características de aridez de la región, ya que según Porta, López-Acevedo y Poch (2013) esta condición no permite que se acumulen grandes cantidades de materia orgánica debido a la escasa precipitación. Estos bajos porcentajes de materia orgánica y nitrógeno, justifican la aplicación de materiales orgánicos con relaciones C/N bajas, por lo que la aplicación de lodos residuales mejoraría los niveles de nitrógeno en la solución suelo al descomponerse lentamente este material orgánico.

Por su parte los lodos, en ambos casos, podemos notar un contenido bajo de materia orgánica respecto a las características presentadas para otros lodos en otros estudios (Tabla 1), este hecho puede deberse a que el lodo utilizado fue extraído de los lechos de secado de las PTAR, estos

lodos yacían allí aproximadamente 8 meses, habiendo estado expuesto a las condiciones climáticas del lugar, factor que pudo haber incidido en el contenido de materia orgánica de los lodos; por otro lado, puede que se haya mezclado los lodos con otro material para facilitar su manejo, es así que de manera sobresaliente, se observa un gran contenido de arena en los lodos residuales (Tabla 14), sin embargo este hecho, puede deberse más a la ausencia de un desarenador en las PTAR, en relación la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS, 2008) indica que el 72 % de las PTAR en el Perú no cuentan con desarenadores (como las PTAR locales), en este contexto, el hecho de que la Norma OS.090 del Reglamento Nacional de Edificaciones establezca que la instalación de desarenadores en lagunas de estabilización es opcional en el diseño del proyecto, resulta contraproducente. Por último, el bajo contenido orgánico puede deberse a la baja eficiencia en el tratamiento, y probablemente la reducida remoción de materia orgánica del agua en tratamiento conduzca a una baja concentración de materia orgánica en el lodo, en relación a esto, Terry *et al.* (2010) indican que cuanto más eficiente el tratamiento de las

aguas residuales, mayor es la producción de lodos, y por tanto será la de materia orgánica. Aún así, los lodos mostraron un contenido mayor de materia orgánica respecto a la tierra agrícola, contenidos que le pueden otorgar valor como abono orgánico o en todo caso como acondicionador/mejorador de suelos. Tal y como indica la United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2000) respecto a los lodos residuales, estos son materiales orgánicos que al incorporarlos al terreno lo abastecen de nutrientes y renuevan la materia orgánica del terreno. Bajo este supuesto, se puede afirmar que los lodos residuales constituyen una fuente de materia orgánica para el suelo.

También se aprecia que respecto a la tierra agrícola, los lodos mostraron un contenido mayor de nitrógeno; al respecto, Soto y Meléndez (2004) indican que el nitrógeno es un elemento frecuentemente utilizado como indicador de la calidad nutricional de los abonos, y mencionan que se han definido niveles mínimos para la calidad de los abonos (aunque también señala que es necesario evaluar otros factores) indicando que un nivel óptimo de nitrógeno es mayor a dos

por ciento. En el caso de ambos lodos, ninguno llegó a cumplir con esta premisa, presentando valores de 1,68 % y 1,22 %, para Copare y Magollo respectivamente, estando el lodo Copare cercano al nivel óptimo. En base al análisis de caracterización realizado a los lodos de Copare y Magollo (Tabla 14), la cantidad disponible de N (acorde a los % de N, y % de disponibilidad que se indica en el ítem 5.3) según las dosis de lodo fue de 84 (25 t/ha), 168 (50 t/ha), 252 (75 t/ha) y 335 (100 t/ha) kg/ha por año para el lodo proveniente de la PTAR Copare, y de 60 (25 t/ha), 120 (50 t/ha), 180 (75 t/ha) y 240 (100 t/ha) kg/ha por año para el de la PTAR Magollo.

Asimismo, los lodos presentaron valores menores de pH, hasta cinco veces un contenido mayor de carbonatos, hasta cuatro veces un contenido mayor de fósforo, la mitad del contenido de potasio y hasta el doble de la CIC respecto a la tierra agrícola. Negrín y Jiménez (2012) manifiestan que para no afectar negativamente al sistema biológico, al crecimiento de las plantas y a la propia estructura del suelo, el pH del lodo a usar en suelos con fines agrícolas debe ser cercano a la neutralidad (pH=7,0) y que la conductividad eléctrica no debe

ser demasiado elevada. En relación a lo anterior, los lodo residuales de Copare y Magollo cumplen con ambos requisitos

En cuanto al fósforo, la cantidad disponible de P (acorde a los % de P, y % de disponibilidad que se indica en el ítem 5.3) según las dosis de lodo fue de 768 (25 t/ha) 1536 (50 t/ha), 2304 (75 t/ha) y 3072 (100 t/ha) kg/ha por año para el lodo proveniente de la PTAR Copare, y de 607 (25 t/ha), 1214 (50 t/ha), 1821 (75/ha) y 2428 (100 t/ha) kg/ha por año para el de la PTAR Magollo.

El contenido significativo de calcio, magnesio, fósforo y nitrógeno total le confiere a estos lodos valor como complemento de fertilizantes, además, el contenido de materia orgánica, lo hace desde el punto de vista agronómico un buen candidato para ayudar a cubrir las deficiencias de materia orgánica, de macro y micro elementos en suelos áridos, favoreciendo esto su bajo costo, ya que el mismo se obtiene como desecho del tratamiento de aguas negras. Con la factibilidad de implementar en el suelo el uso de los lodos residuales provenientes del tratamiento de aguas servidas,

con resultados satisfactorios, se estaría resolviendo desde el punto de vista ambiental el problema de aislamiento y almacenaje de los mismos que durante muchos años se ha venido presentando en numerosos países, producto de las grandes cantidades que diariamente se han venido acumulando. Salgot *et al.* (1982) citados por Acosta *et al.* (1996) indican que la aplicación de estos lodos residuales como fertilizante organomineral en suelos áridos, sin duda alguna, supliría las deficiencias de macro y microelementos como también de materia orgánica.

5.1.2 De los metales pesados

Sobre los metales pesados, se tiene a 22 de ellos en la Tabla 15, de los cuales no todos tienen referencia en alguna normativa sobre su contenido máximo en los lodos; en cuanto a normativa nacional, no existe una que establezca estos límites máximos; sin embargo si nos basamos en la norma de EEUU (Tabla 2) y de la Unión Europea (Tabla 4), podemos encontrar valores límites para algunos de estos metales; la Norma de EEUU, reglamentada por la EPA, establece contenidos máximos en los lodos para 10 metales: arsénico,

cadmio, cromo, cobre, mercurio, molibdeno, níquel, plomo, selenio y zinc; mientras que la Directiva de la Comunidad Europea, referida también a concentración de metales pesados, solo considera a 7 de ellos: cadmio, cobre, níquel, plomo, zinc, mercurio y cromo, aunque para este último deja pendiente el establecimiento de un valor.

Por otro lado, al comparar el resultado del análisis de contenido de metales en los lodos de Copare y Magollo (Tabla 15) con los valores sobre concentración máxima de metales pesados en lodos de la norma estadounidense y europea (Tabla 4 y 6, respectivamente), podemos apreciar que el único elemento que sobrepasa los límites máximos es el arsénico (caso de la norma de la EPA, la de la comunidad europea no establece límites para este elemento) para el caso del lodo proveniente de la PTAR Copare, sin embargo si tomamos referencia de otras normativas, caso de la brasilera, tampoco cumpliría con el límite establecido para plomo (Tabla 29 de Anexos). El lodo de la PTAR Magollo no sobrepasó ninguno de los límites establecidos en las normas antes mencionadas, sin embargo al revisar normativa de países como Brasil y

Chile, este lodo no cumple con los límites establecidos para el arsénico (Tabla 29 de Anexos), puesto que ambas normativas son más exigentes en este aspecto respecto a las dos mencionadas anteriormente.

Refiriéndonos a lo sucedido con el arsénico (As), en el caso del lodo de la PTAR Copare (88,61 mg/kg), la EPA da como concentración máxima permitida en lodos aplicados al suelo, el valor de 75 mg/kg; por lo tanto existe un excedente de 13,61 mg/kg; esto prácticamente haría que este lodo no sea apto para aplicación agrícola según la EPA; para el lodo de la PTAR Magollo (59,04 mg/kg), este excede entre 19,04 mg/kg y 39,04 mg/kg los límites de la norma chilena (20 - 40 mg/kg) y en 18,01 mg/kg la norma brasileña (41 mg/kg). Según Prieto, Gonzáles, Román y Prieto (2009), el arsénico inorgánico bio-disponible produce en humanos toxicidad aguda y la ingestión de dosis altas provoca síntomas gastrointestinales, trastornos de las funciones de los sistemas cardiovascular y nervioso y en último término la muerte, así mismo es un agente carcinogénico. En plantas Smith, Christophersen, Pope y Smith (2010), aseveran que el arsénico

interfiere con el proceso metabólico y disminuye la germinación de las semillas; y respecto al maíz, Ruiz y Armienta (2012), en su trabajo sobre acumulación de metales pesados en maíz cultivados cerca de suelos mineros, y para evaluar la habilidad de las plantas para translocar los metales desde la raíz hacia la parte aérea determina factores de translocación (FT), observando que para las plantas de maíz a los 70 días de desarrollo, los valores más elevados fueron para el arsénico (1,08 – 2,29), cadmio (0,07 – 0,86) y zinc (0,12 - 0,82); indicando que el arsénico es un elemento transferible en las plantas de maíz, y en menor grado el cadmio y el zinc, puesto que, según Raskin y Ensley (2000) y Tu *et al.* (2003), citados por Ruiz y Armienta (2012), las plantas acumuladoras de metales se caracterizan por factores de translocación mayores a 1.

Por su parte, Merli y Ricciuti (2009) señalan que el metal que mayor atención merece es el cadmio (Cd), puesto que se puede acumular en las plantas hasta alcanzar niveles que resultan tóxicos para el hombre y los animales, sin llegar a serlo para las plantas. Es por ello que generalmente la tasa de

aplicación de lodos es determinada por la cantidad de cadmio presente en la misma. No obstante, en el presente trabajo las cantidades de cadmio en los lodos no superaron los 5 mg/kg, siendo el límite establecido por la EPA de 85 mg/kg (Tabla 2), y el de la Comunidad Europea de 20 a 40 mg/kg (Tabla 4) según el pH del suelo donde se aplicarán los lodos.

También podemos apreciar que el lodo proveniente de la PTAR Copare presenta mayores valores en el contenido de metales pesados frente al proveniente de la PTAR Magollo, donde solo el contenido de molibdeno fue ligeramente mayor (Tabla 15). Este hecho, puede estar influenciado por las diferencias en el tratamiento de las aguas residuales en cada PTAR; si bien ambas poseen lagunas de estabilización, las de Copare corresponden a lagunas aireadas (solo las lagunas primarias) y las de Magollo a lagunas facultativas.

5.1.3 De los parámetros microbiológicos

Según lo observado en la Tabla 16, sobre análisis microbiológico de los lodos, tenemos que el Lodo Copare tiene presencia de patógenos, excepto de *E. coli* y *Salmonella*

sp., y el Lodo Magollo mostró ausencia en todos los parámetros microbiológicos. Para determinar su potencial aplicación agrícola, la EPA clasifica a los lodos en Clase A y B, estableciendo requisitos para cada uno de ellos (Tabla 3). Al realizar la respectiva comparación, tomando como punto de análisis el contenido de coliformes fecales y *Salmonella* sp, entonces el lodo Copare corresponde a la Clase B, por exceder el límite de coliformes fecales (1100 NMP/g de sólidos totales) de la Clase A (<1000 NMP/g de sólidos totales); mientras que el Lodo Magollo corresponde a la Clase A, ya que no mostró contenido de patógenos según el análisis. Sin embargo, analizando a detalle los resultados presentados para el lodo Copare, tenemos que la concentración de *E. coli* y *Salmonella* sp. (ausencia en ambos casos), nos indican que el proceso de reducción de patógenos fue eficiente (Giraldo y Lozano De Yunda, 2006; Castrejón *et al.*, 2001), aunque no correlacionó con los resultados presentados para coliformes fecales.

Si bien ambos lodos según el análisis microbiológico podrían utilizarse en agricultura, el lodo Copare de Clase B, podría

hacerse con algunas restricciones; y el lodo Magollo de Clase A sin restricción alguna. En el caso de los lodos Clase B, las restricciones según la EPA Norma 40 CFR Parte 503 (USEPA, 1993), tienen que ver con el tiempo que se debe esperar antes de sembrar y/o cosechar los cultivos, para que la concentración de microorganismos se reduzca hasta niveles aceptables. Este tiempo va de 1 a 38 meses y varía dependiendo del tipo de cultivo y del contacto o no de la parte comestible del alimento con el biosólido. El sitio de aplicación no debe estar cercano a fuentes de agua superficiales o subterráneas y se debe aplicar en épocas secas. Inclusive, los animales no deben ser pastoreados en el terreno durante 30 días después de la aplicación de lodos de depuradora; y también se limita el acceso al público.

Al igual que para los metales pesados, el lodo proveniente de la PTAR Copare mostró contenidos, en este de caso de patógenos, más elevados que el de la PTAR Magollo; según Andreoli, Lara y Fernandes (1999) citados por Torres *et al.*, (2009) la concentración de microorganismos patógenos guarda relación con factores como las condiciones socio-

económicas, sanitarias y de salud de la población, la región, la presencia de animales y el tipo de tratamiento al que el lodo fue sometido; considerando que las aguas residuales provienen de una misma zona metropolitana (Tacna), se descarta la influencia del factor poblacional, incluso el tratamiento de los lodos por deshidratación en lechos de secado fue un factor común en ambas PTAR; y prácticamente quedando como único factor influyente las diferencias en la operaciones seguidas para tratar el agua residual en cada planta, aunque se puede agregar la edad del lodo, determinada por la frecuencia de remoción de los mismos en las lagunas (se detalla este aspecto en el siguiente ítem).

5.2 De la estimación y proyección de la generación total de lodos de las PTAR Copare y Magollo

Al apreciar los resultados de los tres modos en que se estimó la generación de lodos en las PTAR Copare y Magollo (Tabla 17, 18 y 19), notamos que se obtienen cantidades poco similares.

En primer lugar, para la estimación en base a la población (Tabla 17), específicamente de la población que cuenta con servicio de

alcantarillado, quienes son los que contribuyen con aguas residuales a la red, se tomó un ratio de producción señalado por las comunidades de Valencia y de Aragón de España, factor que puede influir en los resultados. Otro aspecto a observar es que el ratio de producción utilizado, considera producción de lodos en materia húmeda, no especificando el porcentaje de humedad que contiene, por lo que se tuvo que aplicar un factor para poder comparar esta estimación con las obtenidas por otras metodologías donde sí se obtuvieron resultados de la producción de lodos en materia seca; en este caso se consideró que los lodos en materia seca constituyen el 20 % de los lodos en materia húmeda. Se obtiene así que el año 2012 se produjeron 4384 t de lodo, asimismo se proyecta que en el año 2014 se generará 4537,50 t de lodo, alcanzando los 5637,63 t en el año 2020.

Por el cálculo en base al agua tratada (Tabla 18), se utilizó datos de volumen volcado a la red (m^3) y porcentaje de tratamiento de aguas residuales dados por la SUNASS (2012). El volumen volcado en este caso se consideró uno solo, puesto que se analizó los volúmenes de años anteriores, observando que los valores no tienen mucha diferencia, inclusive llegando a ser menores que años anteriores; en

el caso del porcentaje de tratamiento sí se observó un crecimiento, determinándose entonces la tasa de crecimiento de este porcentaje (Tabla 32 de Anexos), es así que según la tendencia, a partir del año 2019 se logrará tratar todo el volumen volcado a la red (100 % de tratamiento de aguas residuales), estabilizándose entonces la producción de lodos (a menos que se amplíe la capacidad de tratamiento de aguas residuales). En base a este ratio, correspondiente al Municipio de las Palmas de Gran Canaria en España, se obtuvo que en el año 2012 se produjeron 2112,63 t de lodos, y que en el año 2014 se generarán 2176,48 t, alcanzando 2331,32 t el año 2020.

Por último, en base a las mediciones de los lodos en los lechos de secado (Tabla 19) se prevé que los resultados podrían acercarse más a la realidad, sin embargo, debido a que en las PTAR, los lodos no son extraídos periódicamente, ni de forma anual, según manifiesta el personal técnico y administrativo de la EPS Tacna S.A. encargado de la operación de las PTAR Copare y Magollo, entonces, se desconoce el número de años al que corresponde la cantidad calculada de lodos yacientes en los lechos de secado (12 617,07 t), en todo caso es bastante superior a las estimaciones

anuales realizadas por los otros dos métodos, por lo que podría según los resultados anteriores corresponder a un período entre 3 y 5 años; sin embargo, de acuerdo a la información brindada por el personal de la EPS Tacna S.A., hay que tener en consideración que los lodos en los lechos de secado (estimación parcial) corresponde a la limpieza de solo dos lagunas en la PTAR Copare y cuatro en la PTAR Magollo por lo que si consideramos la estimación total de lodos (31 903,70 t) corresponderían a un período de hasta 15 años. Por otro lado se puede apreciar que la PTAR Magollo produce una mayor cantidad de lodo que la PTAR Copare, debido a que esta última tiene una menor capacidad en cuanto al volumen de tratamiento, además de que desde algunos años y hasta la actualidad se ha reducido por aspectos técnicos su capacidad de tratamiento de 150 L/s a 50 - 60 L/s; igualmente, como se había indicado con anterioridad la cantidad de lodos en los lechos de secado no corresponde a la totalidad de lagunas en cada PTAR, y por los resultados obtenidos, que no demuestran una gran diferencia en la producción de lodos (considerando que se limpiaron 2 y 4 lagunas en la PTAR Copare y PTAR Magollo respectivamente), se puede presumir que la edad de los lodos en la PTAR Copare es mayor, factor que afecta la calidad de los lodos (concentración de

contaminantes) y explica de cierta manera las diferencias entre los lodos provenientes de las PTAR.

Por otro lado, es importante mencionar que las aguas residuales también son conducidas a la planta de Arunta, que no es operada por la EPS Tacna S.A., por lo que se desconoce sus aspectos operacionales y sobre generación de lodos.

Al ser las metodologías de procedencia española, se puede cuestionar los resultados, en base a la realidad nacional y regional, los puntos de cuestionamiento de pueden encontrar en la tecnología empleada en el tratamiento, la eficiencia operacional, y aspectos sociodemográficos y hasta ambientales. Pero a la falta de elementos comparadores para los resultados obtenidos según las mediciones de los lodos en los lechos de secado, se vio conveniente adoptar estos métodos debido a la ausencia de registros de producción local, referencias nacionales y/o latinoamericanas. En cuanto a los aspectos operacionales de las PTAR, la SUNASS (2008) en su “Diagnóstico situacional de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en las EPS del Perú” ha identificado que en las EPS los principales problemas en la gestión de las aguas residuales son: a)

El déficit de cobertura de tratamiento y b) la ineficiencia operativa de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR); en el mismo estudio se indica que el 34 % de las PTAR operativas basadas en lagunaje (143 en total, 116 en lagunaje) se encuentran arenadas o con exceso de lodos; esto supone un tratamiento deficiente y que los lodos se acumulan por largos períodos de tiempo por la baja frecuencia de remoción. Respecto a los sistemas de tratamiento según Andreoli *et al.* (2001) y Metcalf y Eddy (2002) citados por Pedroza *et al.* (2010), las lagunas de estabilización (0,05 - 0,15 L/hab/d.) son las que generan menor cantidad de lodo y el de lodos activados convencionales (3,1 - 8,2 L/hab/d.) son los sistemas con mayor volumen de lodo, aspecto importante a tener en cuenta al escoger un ratio de producción de lodos.

5.3 De la evaluación del efecto de los lodos en el crecimiento de plantas de maíz (de la altura de planta, diámetro de tallo y peso fresco, peso seco y materia seca)

De acuerdo a la Tabla 20, las dosis de lodos no tuvieron un efecto en la altura de plantas de maíz, ya que los lodos en diferentes dosis no demostraron ser superiores entre sí, ni de los testigos (tierra agrícola y NPK), y tampoco existieron diferencias entre lodos

provenientes de diferentes PTAR. Si bien varios autores, como por ejemplo, Monsalve, Escobar, Acevedo, Sánchez y Coopman (2009) y Mateo, Bonifacio, Pérez, Capulín y Mohedano (2011) demostraron que existe una relación directa en los incrementos en la altura de las plantas al aplicarse una fertilización nitrogenada y dosis de fertilización respectivamente; sin embargo, cuando se utiliza abonos orgánicos o estiércoles (fuentes de materia orgánica al igual que los lodos), los contenidos de nitrógeno están sujetos a una tasa de liberación que variará según las características propias de cada fuente de materia orgánica; en relación a este supuesto, Leblanc, Cerrato, Miranda y Valle (2007) mencionan que en los abonos orgánicos gran parte del nitrógeno se encuentra en forma orgánica, por consiguiente para que ese nitrógeno sea utilizable por la planta debe ser mineralizado a una forma inorgánica disponible para la planta. Ese proceso de conversión está muy determinado por la relación carbono/nitrógeno (C/N) además del nitrógeno que contenga el abono.

Al igual que lo sucedido con la altura de planta, las dosis de lodos no tuvieron un efecto en el diámetro de tallo de plantas de maíz, ya que los lodos en diferentes cantidades no demostraron ser superiores a

los testigos (tierra agrícola y NPK), y tampoco hubo diferencias entre dosis de lodos, contrario a lo indicado por Francisco *et al.* (2010), quienes observaron que mayores dosis de lodo favorecieron al aumento del grosor de plantas de maíz, indicado eso, disponibilidad de nutrientes en el lodo.

Si bien, se había indicado que la tasa de mineralización sobre todo del nitrógeno era un factor incidente en la disponibilidad de dicho elemento y por lo tanto en el crecimiento del maíz (por ser el principal elemento limitante), también se había indicado que este proceso depende mucho de la relación C/N, la cual en ambos lodos fue relativamente baja (Tabla 14), por lo que se prevé que prevalezcan los procesos de mineralización a los de inmovilización, por lo tanto la degradación de la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes los caracterizan como un material de buena fertilidad. En relación Ambientum (2013), menciona que si el residuo orgánico de partida es rico en carbono y pobre en nitrógeno (relación C/N alta), la fermentación será lenta, las temperaturas no serán altas y el carbono se perderá en forma de dióxido de carbono. Para el caso contrario, en altas concentraciones relativas de nitrógeno, éste se transformará en amoníaco, impidiendo la correcta actividad

biológica. Soto y Meléndez (2004) consideran un compost maduro el que tenga una relación menor de 20-25. Ambientum (2013) agrega que si el material final obtenido, tras la fermentación, tiene un valor C/N alto, indica que no ha sufrido una descomposición completa y, si el índice es muy bajo, puede ser por una excesiva mineralización, aunque todo ello depende de las características del material de partida. El mismo autor, señala porcentajes de nitrógeno, y relaciones carbono-nitrógeno para fangos crudos y digeridos; teniendo el fango crudo 5,30 % de N y 6,30 de relación C/N, y para el digerido 1,88 % de N y 15,70 de relación C/N. Según lo señalado pudo haber ocurrido una excesiva mineralización en los lodos de las plantas provenientes de Copare y Magollo, debidamente por su excesiva permanencia en los lechos de secado (aproximadamente 8 meses); sin embargo, como indican los autores citados anteriormente, se tendría que analizar también el material de partida, en este caso el lodo crudo, que no fue parte del estudio.

Del mismo modo, la United States Environmental Protection Agency (USEPA, 1983) y Sopper (1993), indican que hasta un 20 % del N está disponible el primer año después de la incorporación del lodo residual deshidratado a diferencia de hasta un 60 % cuando se

aplica en forma líquida. Esto explicó la superioridad en el rendimiento de forraje cuando se aplicó lodo líquido en trigo en la investigación llevada a cabo por Martínez De La Cerda, Olivares, Salinas, Závala y Aranda (2004). Sin embargo, debido a que está disponible en menor tiempo, su efecto residual únicamente se extiende hasta tres ciclos de siembra, a diferencia del lodo deshidratado cuyo efecto se ha encontrado aún después de cinco ciclos de siembra (Sopper, 1993). Por lo tanto, la no existencia de diferencia significativa en el presente trabajo, para la variable altura de planta y diámetro de tallo, puede deberse al corto período de evaluación de las plantas de maíz (60 días); aunque Utria *et al.* (2008) aseveran que las variables área foliar, altura de la planta, diámetro del tallo y peso seco por órganos y total de las plántulas, respondieron positivamente a la aplicación de biosólidos en un periodo relativamente corto de apenas 15 días después de la germinación de las semillas en su trabajo en tomate; en todo caso este hecho requiere de una evaluación más exhaustiva.

Por otro lado, USEPA (1983), Sopper (1993) y Outwater (1994) concuerdan en que los cultivos que obtienen mayor beneficio son aquellos que requieren altas cantidades de P (hortalizas), debido a

que es el elemento que mayor se aporta con la aplicación del lodo residual. El análisis de los lodos (Tabla 14) utilizados tienen 48,60 y 61,50 ppm (4,86 % y 6,15 %) de P (P_2O_5) para Magollo y Copare correspondientemente, y se estima que el 50 % está disponible el primer año cuando se aplica en forma líquida y/o deshidratada.

Martínez De La Cerda *et al.* (2004) en su investigación en trigo, no encontraron diferencias significativas entre dosis de lodos de 8 y 4 t/ha en rendimiento de forraje, pero sí en el segundo ciclo de siembra. Esto también es evidencia de que para encontrar resultados más contundentes en la eficiencia de un material orgánico como los lodos, la evaluación no solo debe comprender un primer ciclo de siembra, ya que su efecto es más duradero y más evidente en ciclo posteriores.

A su vez, Francisco *et al.* (2010) señalan que la planta sufre el efecto de un lento grado de transformación (mineralización) producido por las mayores dosis de lodo afectando en su crecimiento y desarrollo. Este proceso requiere la evaluación de la estabilidad del lodo antes de su aplicación. En relación a lo señalado, Ramírez *et al.* (2007), evidenciaron una respuesta negativa en las variables diámetro de

tallo y altura de planta, en donde las dosis más altas de biosólido, inhibieron el crecimiento. Se presentaron plantas pequeñas, con poca producción de hojas nuevas, un deficiente desarrollo de raíces y una baja sobrevivencia. Si bien en el presente trabajo no se evidenció completamente los hechos indicados, se puede agregar que la homogeneidad en los efectos de los tratamientos pudo deberse también a las propiedades físicas de la mezcla suelo y lodo (aunque poco perceptible, debido a las bajas cantidades de lodos aplicados, ver Tabla 11), ya que solía compactarse, pudiendo entonces afectar el crecimiento de las plantas.

En el caso de peso fresco, peso seco, materia seca (biomasa), se presentó alta significación para los tratamientos (Tabla 22, 24 y 26, respectivamente), por lo que las dosis de lodos tuvieron un efecto diferente para estos parámetros, si bien estas diferencias podrían atribuirse al nivel de fertilidad, debido a la aplicación de lodos en el suelo, no queda claro este supuesto, ya que no se pudo comprobar lo mismo para los otros parámetros (altura y diámetro de tallo), igualmente no hubo un comportamiento en estos parámetros acorde a las dosis de lodos, es decir no necesariamente mayores dosis de lodos obtuvieron los mejores resultados, independientemente de si

fueron significativos o no. Francisco *et al.* (2010) indican que la mayor acumulación de materia seca en el maíz es influida por el nivel de fertilidad y disponibilidad de nitrógeno, elemento asimilable adecuado del suelo y factor limitante más común de las plantas, y un suministro deficiente puede provocar descensos notables en la producción vegetal. Del mismo modo, Muñoz (2003) asevera que el contenido de materia seca correlaciona positivamente con el nitrógeno mineralizado durante el período 7 a 42 días pero negativamente con la relación C/N. Igualmente Varnero, Benavides y Uribe (1998) indican que la extracción de N es proporcional a la acumulación de materia seca. Al respecto, Martínez (s.f.), menciona que la producción de la biomasa total, peso total de la planta (Índice biológico), está directamente relacionada con el contenido de nutrientes, asimismo el contenido de nutrientes esenciales en los tejidos vegetales viene determinado por varios factores entre los que podemos destacar a) la dotación genética de la planta; b) la disponibilidad de nutrientes en el suelo o medio de cultivo, y c) el momento fenológico o edad de la planta y el órgano o tejido vegetal que se considere.

También, tal y como se puede observar en la Tabla 24, 26 y 28, para los parámetros de biomasa, los lodos procedentes de la PTAR Magollo alcanzaron mejores resultados que los lodos de la PTAR Copare, la diferencia fue numérica y no necesariamente para todos los casos de carácter estadístico.

Por otro lado, si bien no se evaluó la concentración de metales pesados en las plantas de maíz, se considera que no se alcanzarían niveles en tóxicos en plantas ni suponer un riesgo para la salud animal y humana; dadas las bajas concentraciones de metales (a excepción del arsénico para el lodo proveniente de la PTAR Copare) y los relativamente bajos contenidos de patógenos en ambos lodos. En relación a esta cuestión, Martínez De La Cerda *et al.* (2004) al estudiar el efecto residual de lodos en trigo, observó concentraciones similares en las plantas para dos dosis diferente incluido el testigo, lo que indica que el suelo sin tratamiento tiene estos elementos por naturaleza y la cantidad agregada con lodo residual es mínima. También, asevera que la absorción de metales pesados es muy baja en suelos con pH alcalino, ya que tienden a precipitarse y no están disponibles para las plantas. Asimismo, indica que sus resultados coinciden con otras investigaciones

realizadas, donde indican que la semilla acumula menor cantidad de Cd y Zn, por lo que es difícil que las concentraciones superen los límites de tolerancia permitidos. Otros elementos tales como el Cu, Ni y Pb son absorbidos en muy bajas concentraciones, debido a que se adhieren a las paredes de las raíces de las plantas evitando así la acumulación dentro de los tejidos vegetales.

En plantas de maíz, Ruiz y Armienta (2012) concluyen, que las concentraciones de metales y metaloides tóxicos en las plantas presenta el siguiente orden: Zn > Pb > Cu > Cd > As en raíz y parte aérea; y la acumulación de metales y metaloides tóxicos en los diferentes órganos de las plantas de maíz se presentó en el siguiente orden: raíz > parte aérea. Esto constituye un aspecto positivo en la acumulación de metales pesados en las plantas, puesto que en el caso del maíz, la parte que se consume se encuentra en los órganos aéreos (hojas y frutos). De igual forma, Vaca *et al.* (2002) en su estudio bromatológico, concluye que la adición de lodos residuales al suelo aumentó la concentración de Fe en *Zea mays*. Asimismo la adición de 24 t/ha aumentó significativamente la concentración de Zn en el grano. La alta concentración de Zn causó una deficiencia en la concentración de

Mn. Finalmente, la calidad nutrimental de *Zea mayz* no se vio afectada por la adición de lodos residuales y es apto para el consumo humano.

5.4 De la normativa y contexto nacional e internacional

Actualmente, en el país no existe una norma técnica específica que determine la aplicabilidad de los lodos residuales; solo se cuenta con la Norma OS.090 referida a Plantas de tratamiento de aguas residuales (que lo considera acondicionador del suelo por su contenido de nutrientes), la cual en su inciso 5.9.4 (Aplicación de lodos sobre el terreno), en cinco puntos expresa ligeramente sobre las condiciones que deben tener los lodos para su aplicación, así como de las características del terreno donde se aplicará el lodo (en el Capítulo III. Marco Teórico, en el ítem 2.4.5.7 se describe más detalladamente esta parte de la norma), y si bien menciona que deberá tenerse en cuenta aspectos como concentración de metales pesados y compatibilidad con los niveles máximos permisibles, no precisa cuales deben ser tales concentraciones, en todo caso no indica referirnos a alguna norma internacional, mejor dicho no es explícita en la calidad del lodo que podría aplicarse al terreno. Por otra parte, el DS N° 057-2004-PCM (Reglamento de la Ley N° 27314

- Ley General de Residuos Sólidos), en su Artículo 27º considera a los lodos residuales como un residuo, calificándolo como Residuo Peligroso (Anexo 4, Lista A), ubicándolo en el grupo de Residuos metálicos o que contengan metales. Este mismo reglamento, en su Artículo 32º, sobre Medidas necesarias para controlar la peligrosidad, indica que “El generador o poseedor de residuos peligrosos deberá, bajo responsabilidad, adoptar, antes de su recolección, las medidas necesarias para eliminar o reducir las condiciones de peligrosidad que dificulten la recolección, transporte, tratamiento o disposición final de los mismos. En caso que, en función a la naturaleza del residuo no fuera posible adoptar tales medidas, se requerirá contar con la conformidad de la Autoridad de Salud, la que indicará las acciones que el generador o poseedor debe adoptar”. Por lo tanto, es función de las EPS (Entidades Prestadoras de Servicio) y excepcionalmente de DIGESA (Dirección General de Salud Ambiental), determinar su manejo y disposición final.

Cabe mencionar que existe un Plan Nacional de Saneamiento: 2006 - 2015, elaborado por la SUNASS, el cual prevé alcanzar una cobertura de 100% de tratamiento de aguas residuales,

entendiéndose por esta meta que al año 2015 la población servida con tratamiento de aguas residuales sea igual a la población atendida en alcantarillado. En este contexto, y suponiendo que se logre alcanzar dicha meta, la generación nacional de lodos se vería incrementada hasta en tres veces (considerando que el tratamiento de aguas residuales es directamente proporcional a la generación de lodos), ya que en la actualidad el tratamiento de aguas residuales según la SUNASS (2012) alcanza el 32,7 % del volumen volcado por las EPS. Por tal motivo, y ante la posibilidad de encontrarse con grandes volúmenes de residuos peligrosos (como lo califica el DS N° 057-2004-PCM), es necesario establecer una forma adecuada de manejar y disponer los lodos, de modo de evitar posibles impactos negativos en el ambiente.

A nivel internacional, en cuanto a lodos residuales, ocurre que existen normas específicas, dado su variedad de uso, formas de disposición final y posibilidades de reciclaje, algunas de carácter agronómico al existir la posibilidad de utilizarlos como abonos y enmiendas orgánicas en los suelos (Miranda y Reyes, 2005).

La Comunidad Económica Europea (CEE) fue una de las primeras en formular normativa específica sobre aplicación de lodos en agricultura, y su importancia radica en su amplio ámbito de uso y por ser la base para la elaboración de normativa propia en los diferentes Estados miembros. También los Estados Unidos, posee normativa sobre este tema, siendo según Miranda y Reyes (2005) la más completa sobre tratamiento y disposición de biosólidos, y muchas reglamentaciones posteriores en otros países están basadas en ella. En Latinoamérica, Torres *et al.*, (2009) mencionan que México, Chile, Brasil y Argentina son algunos de los países que tienen normativa en relación a los lodos en agricultura, y muestran algunas variaciones respecto a las dos primeras; Colombia a la actualidad cuenta con un proyecto de norma sobre el tema. En ese sentido, se pretende en este análisis, abordar las normativas específicas sobre aplicación de lodos en agricultura de los países en mención.

El marco jurídico de lodos residuales de la Unión Europea viene constituido por la Directiva 86/278/CEE, del 12 de junio de 1986, formulada por el Consejo de Comunidades Europeas. Esta directiva es relativa a la protección del medio ambiente, y en particular de los suelos en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura;

esta regula las características que deben tener los lodos para ser aplicados al suelo, estas características están basadas en su concentración de metales, estableciendo valores límites para seis de ellos (si bien se menciona al cromo, se indica que se fijará un límite en posteriores propuestas), asimismo en su Artículo 8, indica qué valores límites se usarán para suelos de pH inferior a 6 (teniendo en cuenta la movilidad de los metales y su absorción). A su vez menciona en el Artículo 6, que los lodos a utilizarse para la agricultura deben tratarse, sin embargo los Estados miembros pueden autorizar la utilización de lodos no tratados cuando se inyecten o entierren en el suelo. También establece períodos o plazos donde se prohíbe la utilización de lodos acorde al tipo de cultivo donde se aplicarán, es así que tiene plazos para cultivos para pienso o pastoreo, cultivos hortícolas y frutícolas (excepción árboles frutales), y cultivos hortícolas y frutícolas que estén normalmente en contacto con el suelo y que normalmente se consuman crudos. Por otra parte establece el límite de concentración de metales pesados en los suelos donde aplicarán los lodos, como también las cantidades anuales de metales pesados que se podrían introducir en las tierras cultivadas basándose en una media de 10 años. Es importante mencionar, Generalitat Valenciana (2008), indica la

existencia de una propuesta de Directiva del parlamento europeo sobre aplicación de lodos en suelos. Dicha propuesta se realizó en abril de 2003 y forma parte de la estrategia de protección de suelos, como destaca la Comunicación de la Comisión “Hacia una estrategia temática sobre la protección de suelos”. Según la Comisión, el uso de fangos de depuración en suelos agrícolas como fertilizante es normalmente la mejor opción medioambiental, siempre que el lodo no suponga ninguna amenaza para el medio ambiente ni para la salud humana. Por ello, la propuesta de Directiva apuesta por una utilización monitorizada y controlada de los lodos de depuración. Al mismo tiempo, indica que debe regularse de forma restrictiva, si fuera necesario, para tener en cuenta los posibles efectos a largo plazo. Con esta propuesta, la Comisión pretende afirmarse en su compromiso de un uso adecuado en agricultura de los lodos de depuración y pretende ver incrementarse la cantidad de lodos de depuración utilizados en agricultura durante los próximos 5-10 años. Tales propuestas aparecen efectivamente condiciones de uso más restringidas, obligaciones de control e información más exigentes y se reducen los valores límites de concentración de metales pesados; es así que en los “Valores relativos a las concentraciones de metales pesados en los suelos que reciban los lodos”, se amplía el rango de

pH de suelos receptores, proponiendo además tres tipos de suelos agrícolas ($5 < \text{pH} < 6$, $6 < \text{pH} < 7$ y $\text{pH} > 7$) y reduce para algunos metales hasta 50 % de su valor límite (los valores superiores de la Directiva se mantienen para tierras que no se utilicen para agricultura, $6 \leq \text{pH} \leq 7$, además agrega límite para cromo). También, en los “Valores relativos a las concentraciones de metales pesados en los lodos para su uso en suelos”, considera un valor límite único para cada metal pesado, considerando para algunos el valor inferior de la Directiva y para Cd y Cu incluso los reduce. Igualmente, para los “Valores relativos a las cantidades máximas anuales de metales pesados que pueden ser introducidos en los suelos destinados a la agricultura”, reduce considerablemente (hasta más de 6 veces) cada uno de estos valores límites. Por otra parte, surgen además nuevos parámetros a valorar, claramente limitados, como la presencia de *Salmonella* y *E. coli*, los compuestos orgánicos y las dioxinas. Aunque, Henríquez (2011) menciona que si bien la Directiva 86/278/CEE no propone ningún límite respecto del contenido de contaminantes orgánicos en lodos, algunos países como Alemania lo han introducido; tampoco hace mención específica a concentraciones de patógenos, pero países como Italia, Francia, Luxemburgo, Dinamarca y Austria han incluido límites respectivos.

Retomando el análisis sobre la Directiva 86/278/CEE, los países miembros de la Unión Europea, tenían un plazo de tres años, que finalizaba en 1989, para que incorporaran a sus respectivas normativas las directrices de la norma. Es así, que en el caso de España, esta Directiva fue transpuesta al Derecho español en el RD 1310/1990, que designa al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y a las autoridades responsables de las Comunidades Autónomas en esta misma materia como los competentes en materia de aplicación y control de la citada Directiva. Si bien se incorporó esta norma de ámbito europeo a la legislación española, esta muestra diferencias, siendo más restrictiva en algunos aspectos; precisamente, en el Artículo 2 permite solo la utilización de lodos tratados, imposibilitando la inyección o entierro al suelo (Artículo 6 de la Directiva). Por otro lado, para la concentración de metales en los suelos, diferencia valores límites para suelos con pH menor de 7 y mayor a 7, optando por incrementar en estos últimos tipos de suelos hasta 50 % de lo señalado en la Directiva (hecho que la misma permite). Igualmente para la concentración de metales pesados en los lodos, diferencia valores límites para los mismos tipos de suelos, pero en este caso no se incrementaron los límites superiores para los suelos con pH mayor a 7, pero si se establecen

valores para el cromo al igual que para el anterior caso. Adicionalmente se crea también el Registro Nacional de Lodos que está adscrito al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (actualmente Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). El presente Real Decreto, según Allue (1999), tomó desarrollo a través de la Orden de 26 de octubre de 1993 sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario. Así mismo en la legislación española, se adopta principios básicos de filosofía ecológica, entre ellos el Principio de Jerarquía, el cual establece este orden de prioridad, de mayor a menor: prevención, reutilización, reciclaje, valorización energética y eliminación (vertedero o incineración sin recuperación de energía) (Ministerio de Medio Ambiente, 2007); la aplicación del principio de jerarquía de residuos a la gestión de los lodos de EDAR supone, en primer lugar, priorizar la aplicación al suelo, en segundo lugar emplear otras formas de valorización incluyendo la energética y, como última opción, la eliminación en vertedero. Tanto el anterior Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales (2001-2006), como el Plan Nacional Integrado de residuos 2008-2015 hacen referencia a este principio de jerarquía (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009).

Entre otras normas, en el ámbito agrícola comunitario de los lodos de depuración también les resulta de aplicación la Directiva del Consejo 91/676/CEE (transpuesta al derecho español mediante el Real Decreto 261/1996), relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos empleados en agricultura, que contempla como fertilizante a los lodos de depuración.

Cabe destacar la tendencia al alza de la producción de lodos en estaciones depuradoras, especialmente a partir de enero de 2006, con la entrada en vigor de la Directiva 91/271/CEE sobre tratamiento de aguas residuales urbanas (transpuesta a la legislación española a través de la Ley 11/1995) por la que se obliga a los países miembros de la Unión Europea a la depuración de aguas urbanas de poblaciones de más de 2000 habitantes-equivalentes que viertan en aguas continentales.

Volcándonos para terreno americano, tenemos como una de las pioneras en la materia, a la norma estadounidense, 40 CFR (Code of Federal Regulation) Part 257, 403 y 503, referida a los “Estándares de uso y disposición de biosólidos de aguas residuales”, promulgada por la EPA en el año 1993. En la parte 503 según Miranda y Reyes

(2005) es donde se establece los requisitos para el uso y la disposición final del lodo de aguas residuales en tres circunstancias (a diferencia de la legislación europea que solo consolida el uso agrícola en una misma norma). Primero, las regulaciones establecen los requisitos para el lodo de aguas residuales cuando el lodo se aplica a la tierra para un propósito beneficioso. En segundo lugar, cuando el lodo es dispuesto en rellenos sanitarios. Tercero, cuando se incineran. Los estándares para cada práctica del uso final y de la disposición consisten en requisitos generales, límites numéricos en las concentraciones del agente contaminador en lodo de aguas residuales, prácticas de gerencia y, en algunos casos, requisitos operacionales. La regla final también incluye requisitos de la supervisión, del mantenimiento de registros y de divulgación.

Esta norma, se diferencia también en que los límites de concentración se dan para un mayor número de metales pesados, exactamente de 10 (frente a los seis de la europea), agregando el As, Cr, Mo y Se. Sin embargo al comparar el valor numérico de las concentraciones dadas por ambas normas (Tabla 2, 4 y Tabla 29 de Anexos), se podrá notar que las normas europeas (la comunitaria y española) son más estrictas en cuanto a los metales pesados en los

lodos, ya que sus valores límites superiores son menores hasta en más 50 % para algunos metales. No obstante la norma de la Unión Europea no presenta (mas sí en sus propuestas en borrador) límites en el contenido de patógenos en los lodos, como sí los hace la 40 CFR Part 503; en este sentido clasifica a los biosólidos en A y B de acuerdo a la cantidad de patógenos presentes, así mismo es enfática en la parte sanitaria, pues proporciona una serie de procesos para reducir patógenos y otros vectores de enfermedades, de la misma manera acorde a esta clasificación define restricciones de aplicación de los lodos, orientadas a la clase B, y que están enmarcadas en base al tipo de cultivo, el contacto con la tierra del producto consumible, el tiempo de espera para sembrar después de la aplicación, y el acceso al público del terreno. Otro aspecto que distingue una norma de otra, es que la norma de la EPA, no define la concentración máxima de metales pesados en suelos antes de la aplicación de lodos.

En Latinoamérica, la elaboración de normas sobre lodos residuales y su potencial uso en la agricultura, comienza a partir del año 2000. Normas que generalmente tomaron como base la norma de los Estados Unidos (40 CFR Parte 503), teniendo en cuenta también los

estándares elaborados por la Comunidad Europea. En tal sentido, tenemos a la Norma Oficial Mexicana, NOM-004-SEMARNAT-2002, de protección ambiental de lodos y biosólidos y que da las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Esta norma también es enfática en disminuir la presencia de patógenos, cabe mencionar que establece límites para ocho metales pesados (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni y Zn), y los niveles son similares a los de la norma de la EPA, aunque la norma mexicana es más estricta en el contenido de coliformes fecales, *Salmonella spp.* y huevos de helmintos. Si bien no define tasas de carga contaminante (acumulada o anual) de metales pesados como lo hace la EPA, considera dos tipos de lodos en base a su concentración de metales pesados, Excelentes y Buenos, que posteriormente al interaccionar con la clasificación según su contenido de patógenos y parásitos (clase A, B y C, aspecto que diferencia a esta norma de todas las otras) define la forma de aprovechamiento de los biosólidos (urbano con o sin contacto público, forestal, mejoramiento de suelos y uso agrícola). Por otra parte en sus anexos, especifica extensamente los métodos de muestreo, así como cada uno de los métodos a seguir para analizar cada uno de los aspectos (patógenos, parásitos y metales

pesados) que delimitan el uso de los lodos, incluyendo reactivos, aparatos y procedimiento a seguir.

La normativa mexicana, considera también a los lodos residuales en sus leyes sobre residuos sólidos (ley general de equilibrio y protección al ambiente de la SEMARNAT), considerándolo como un residuo potencialmente peligroso; justamente Jurado *et al.* (2004), indican que por su gran número de microorganismos patógenos, los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales son en consecuencia residuos biológicos infecciosos; y en cuanto a las aguas residuales industriales, Cardoso y Tomasini (s.f.) refieren que el contenido de sustancias tóxicas se puede incrementar notablemente, siendo posible la presencia de metales pesados y muchos otros compuestos orgánicos, en estos casos, el mayor riesgo que representan este tipo de lodos es por su contenido de sustancias tóxicas, corrosivas, reactivas, explosivas o inflamables. Por estas razones los lodos de desecho de las plantas de tratamiento son residuos potencialmente peligrosos y es preciso aplicarles según la NOM-052-SEMARNAT-1993 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 1993), el análisis CRETIB (corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad,

inflamabilidad y biológico-infeccioso) para determinar si lo son o no, y con base a ello definir su destino final. Esta norma oficial mexicana coincide parcialmente con la norma de Estados Unidos, el Code of Federal Regulations (CFR), Vol. 40, Part 261, "Identification and listing of hazardous waste" (Código Federal de Regulaciones, Vol. 40, Parte 260, "Identificación y listado de residuos peligrosos") del año 1991. Según Jurado *et al.* (2004) y Oropeza (2006), para el aprovechamiento de los biosólidos como mejorador de suelos y fertilizante, deben ser declarados "no peligrosos" para el ambiente, en base a este análisis. Castrejón *et al.* (2001) añade, que si un lodo residual por alguna de sus características se consideraría como residuo peligroso, se descartaría totalmente de ser aprovechado benéficamente o de ser dispuesto. Como residuo peligroso está sujeto a su disposición en un confinamiento controlado.

En Brasil, según Xavier, Días, Ferreira y De Assis. (2009) la legislación vigente impone, serias restricciones para el uso de lodos residuales y, por consiguiente, el desafío de las empresas concesionarias de servicios de saneamiento, es la obtención de argumentos bien fundamentados científicamente para sus posibles usos. La resolución CONAMA N° 375/2006 (publicada en agosto de

2006) en su Artículo 11º establece que “pasado cinco años después de su publicación, solamente será permitida la aplicación de lodos residuales o productos derivados Clase A, excepto sean propuestos nuevos criterios o límites basados en estudios de evaluación de riesgo y datos epidemiológicos nacionales, que demuestren la seguridad del uso de lodos Clase B.” Entre otros aspectos restrictivos de esta norma, se pueden mencionar que dentro de la caracterización requerida para el uso de lodos, se considera adicionalmente a las de otras normas, dentro de los metales pesados (11 en total para esta norma) al bario, además de la determinación de una larga lista de sustancias orgánicas en el lodo y en los suelos.

Respecto a la normativa de lodos en Argentina, se tiene como marco regulatorio al Reglamento para el manejo sustentable de barros generados en plantas de tratamiento de efluentes líquidos, aprobado el año 2001 por la Resolución 97/01, refiriéndose en este caso particular a los lodos con el término de “barro”. Este reglamento en primera instancia categoriza a los lodos en Categoría A y B en base a sólidos volátiles y nivel de estabilización, de cumplirse los valores límites el lodo corresponde a la categoría A, estos son

caracterizados para definir su tipología y su aptitud de uso y disposición final; es así que existen cinco tipos de barro: Tipo A.1, A.2., A.3, A.4 y A.5; correspondiendo los dos primeros a biosólidos y por lo tanto siendo aptos para todo uso (agrícola/ganadero, forestal, etc.) sin y con restricciones sanitarias respectivamente; los otros tipos de barro más que todo deben ser destinados a su disposición final en rellenos sanitarios. Al igual que la norma brasilera, elabora un listado de compuesto orgánicos, que en este caso los barro a utilizarse no deben contener (solo establece valor límite en barro para Bifenilos policlorados, 0,8 mg/kg), además presenta una lista de características peligrosas (en la cual establece parámetros similares al Análisis CRETIB, mencionado en la norma mexicana) que tampoco deben poseer los barro. En cuanto a los valores límites de metales pesados en los lodos, estos son muy similares a los establecidos por la norma europea. Asimismo establece condiciones (sólidos volátiles, pH, metales pesados y compuestos orgánicos) para la disposición de los barro en rellenos sanitarios, fijando valores límites en el mismo barro y en su lixiviado.

En el caso de Chile, debido a ciertas particularidades similares a la situación peruana, sobre todo de la región Tacna, es que se

considera importante incidir en su normativa. El Decreto Supremo N° 4/2009, “Reglamento para el Manejo de Lodos generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas”, fue oficializado en octubre de 2009 y entró en vigencia el 28 de abril de 2010 (HENRIQUEZ, 2011). Esta regula el manejo de los lodos y protege los suelos a través de concentraciones máximas de elementos traza metálicos en lodos y suelos. Esta norma fue establecida de acuerdo a investigaciones y experiencias obtenidas en EEUU y países de Europa, principalmente, ya que en ellos los lodos han sido manejados por varios años (Miranda y Reyes, 2005). Presenta similitud con la norma europea ya que reconoce el principio de protección de suelos (Henríquez, 2011) y al comparar los límites de concentración de contaminantes de ambas normas, la chilena es más restrictiva (inclusive que los de la EPA), aunque según Miranda y Reyes (2005), en Chile los lodos presentan características de poca peligrosidad, ya que, los metales pesados incorporados se presentan en bajas concentraciones, lo que es un buen indicador para efecto de su uso posterior. En la normativa el lodo sólo se considera un acondicionador de suelos, por su alto contenido de materia orgánica, pero no se reconoce su aporte de nutrientes. Investigadores como Paz, Henríquez y Freres (2007) y Henríquez

(2011) coinciden en que se presentan imprecisiones tales como dividir el país en dos macrozonas (art.4 letra l y m del DS N° 4), situación que debe ser replanteada, esta distinción según estos investigadores parece extremadamente genérica si se considera la alta variación espacial de los suelos y las condiciones climáticas, por lo que, no se justifica la división actual, más bien se sugiere dejar como criterio el pH del suelo ya que es quizás la propiedad más determinante de analizar en el suelo antes de la aplicación del lodo, ya que es condicionante de la mayoría de los procesos químicos y biológicos que ocurren en el sistema suelo-agua-plantas. Además, el pH, influye en la disponibilidad de elementos traza metálicos y en las formas en que éstos se encuentran en el suelo, en el comportamiento del fósforo, en la mineralización de nitrógeno, capacidad de intercambio iónico y reacciones de hidrólisis.

La norma chilena también se asemeja a la normativa EPA 503, especialmente en la definición de criterios sanitarios de los lodos, de los requisitos para conseguir su estabilidad, de los diferentes tipos de tratamiento a los que pueden ser sometidos y también clasifica los lodos en dos clases (A y B). Si bien, la norma indica valores de concentración de elementos traza metálicos que deben cumplirse

tanto en el lodo como en los suelos, existe la posibilidad de aplicar lodos por una única vez, en suelos en los que se sobrepasa el contenido de algún metal pesado. La norma no considera cargas máximas de elementos traza metálicos en suelos por año, a diferencia de lo que se reglamenta en las normas EPA, europea, brasilera y argentina, que sí incorporan esta restricción como una manera de proteger los suelos, tampoco considera una tasa de aplicación agronómica en función de la demanda nutricional de las especies vegetales asociadas. Es así que, la tasa de aplicación de lodos de 90 t/ha/año se puede considerar extremadamente alta, si se compara con los rangos que plantea la norma europea según Henríquez (2011) de entre 1 a 10 t/ha/año en un período de 10 años; igualmente los suelos no cumplieren con los requisitos que la normativa indica, esta contempla una única aplicación de no más de 30 t/ha, en caso de no haber sido receptores de lodos (Artículo 23º).

Por otra parte, la normativa chilena, carece de regulaciones para compuestos orgánicos (como si se pueden encontrar en la norma brasilera, argentina y propuestas en borrador de la Directiva europea). Asimismo Toro (2005) señala que es necesario definir en forma más detallada los pasos a seguir en la utilización de biosólido

en suelos forestales, tales como: restricciones de aplicación según edad de la especie; registro de la zona y fecha de aplicación para evitar sobrepasar las tasa máximas de aplicación estipuladas; delimitación del área aplicada y su zona de amortiguamiento, de modo que el biosólido no quede expuesto; también indica que la presente norma no separa el área forestal de la agricultura, aún cuando existen más restricciones como insumo agrícola que forestal.

Por último, se tiene a la normativa colombiana, la cual establece los criterios de calidad y uso para el aprovechamiento y disposición final de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales y se toman otras determinaciones; que a la fecha solo es un borrador decreto. Esta propuesta de norma tiene bastante similitud a la norma de la EPA, sobre todo en los límites establecidos para metales pesados y parámetros microbiológicos. Sin embargo para clasificar usa el término “categoría” a diferencia de todas las otras normas que utilizan el término “clase” (a excepción de la argentina que usa el mismo término), asimismo define tres categorías de biosólidos (A, B y C), pudiendo utilizarse la categoría A y B en agricultura, ganadería, plantaciones forestales, entre otras aplicaciones al suelo, mientras que la categoría C solo se puede

aprovechar en la operación de rellenos sanitarios o bien ser dispuestos allí, y en procesos de valorización energética, aún así esta última categoría (al igual que las dos otras) debe pasar por procesos de estabilización y por alguna de las opciones de reducción de la capacidad de fermentación, atracción de vectores y patógenos.

En la mayoría de estas normas (no las europeas), los biosólidos se clasifican en Clases A y B (Tabla 32 de Anexos), con excepción de la norma mexicana y propuesta de norma colombiana, que introduce una tercera categoría (clase C), sin embargo solo en la norma mexicana se contempla la aplicación al suelo de esta última categoría. Se resalta en las normas mostradas que mientras todas a excepción de las europeas, establecen límites para coliformes fecales, *Salmonella* sp. y huevos de helmintos, los virus sólo son reglamentados en la norma norteamericana y brasilera, aunque en la norma argentina se considera Indicadores virales (Reducción del 99,9 % de la densidad de bacteriófago somáticos de *E. coli*), parámetro que según esta norma es de aplicación transitoria, hasta definir un indicador viral más adecuado. Un aspecto que no se encuentra considerado en las normativas corresponde según Henríquez (2011) a la concentración de elementos traza metálicos

disponibles, o fitodisponibilidad que mide la peligrosidad actual para las plantas. Los valores de concentración de elementos traza metálicos se expresan como concentración total, que es válida para evaluar la peligrosidad potencial o futura y solo representa el grado de contaminación. Aunque en general, los elementos traza metálicos son poco móviles en el suelo y tienden a acumularse en la parte superficial. Además estas normas no contempla en muchos casos (o lo hacen ambiguamente) medidas ambientales asociadas a una remediación de suelos por una sobre acumulación de elementos traza metálicos (Henríquez, 2011).

En todas las normas vigentes en América Latina, se definen criterios para aplicación agrícola. No obstante, hay que considerar que muchos países de América Latina todavía no cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales o sólo con una cobertura baja del servicio de saneamiento básico, por lo que sólo se están generando reducidas cantidades de lodos. En todo caso, la utilización de lodos en la agricultura en América Latina, a pesar de ser una práctica relativamente conocida en algunos países hace ya varios años, no representa un gran porcentaje del destino de los lodos, ya que la

gran mayoría es dispuesto en rellenos sanitarios (Mena, 2008, citado por Henríquez, 2011).

En síntesis, el cumplimiento de las nuevas leyes y normas ambientales sobre tratamiento de aguas residuales; permitirá un aumento en la generación de biosólidos a nivel nacional e internacional. Sin embargo, el Perú carece de una reglamentación específica para uno de los principales productos de este tratamiento; esto nos obliga a la búsqueda de mejores alternativas para el aprovechamiento de los biosólidos en términos económicos, sociales y ambientales. El contenido de materia orgánica y nutrientes como el N y P, según Jurado *et al.* (2004) hacen de los biosólidos un subproducto con alto potencial para ser utilizado en la agricultura; sin embargo, su alta variabilidad en la composición química es una limitante cuando se trata de establecer un programa de aprovechamiento o uso benéfico, ya que el alto costo de análisis representaría un problema para el usuario. Por tales motivos, para realizar una adecuada gestión de los lodos residuales, es necesario contar con un marco regulatorio, que establezca criterios de calidad y uso para el aprovechamiento o disposición final de los lodos generados en las PTAR para su incorporación al ciclo económico

productivo, para prevenir y controlar contaminaciones y determinar criterios de manejo, control y seguimiento ambiental de la producción de lodos. Asimismo por la variabilidad del territorio peruano, una futura normativa tendría que considerar realizar una zonificación del territorio con aptitud de recepción de lodos, acorde a las características climáticas y de suelo, puesto que zonas como la de la selva (e inclusive sierra), donde no solo las altas precipitaciones representan un riesgo de contaminación de las aguas por el lavado de nutrientes, sino que los suelos por el mismo factor son de naturaleza ácida, hecho que contribuye a una mayor disponibilidad de los metales pesados para las plantas (toxicidad, bioacumulación).

5.5 De la factibilidad de aplicar los lodos en agricultura en Tacna

Acorde a la discusión de los resultados en anteriores ítems, podemos decir, que los lodos analizados provenientes de las PTAR Copare y Magollo, desde el punto de vista de fertilizante u abono (Tabla 14), no llegan a cumplir con todos los requisitos que la literatura menciona; inclusive su contenido de materia orgánica es bajo respecto a otros lodos señalados con alto potencial de aplicabilidad en la agricultura, por razones ya indicadas con anterioridad. Sin embargo esto no excluye que los lodos que se

puedan generar con posterioridad tengan mejores características desde el punto de vista agrícola, en el marco de una mejor gestión de los lodos y aguas residuales, y que los presentes lodos constituyan un material mejorador del suelo.

Así también desde el punto de vista de protección ambiental y de la salud humana, los lodos mostraron niveles aceptable de metales pesados (con excepción del arsénico) y patógenos (Tabla 15 y 16 respectivamente), considerando que estos no habían seguido ningún tipo de tratamiento de estabilización, tal y como se indica en las diferentes normativas analizadas (Tabla 29 y 31 de Anexos). De este modo, los lodos provenientes de las PTAR Copare y Magollo tienen potencial de alcanzar mejores niveles de calidad, que permitan su uso tanto en espacios con contacto público (parques, jardines, etc.), como en zonas agrícolas, forestales, y para recuperación de áreas degradadas. Al respecto Barrios (2009) asevera que no existe un solo caso documentado de enfermedades en animales o humanos por el uso de biosólidos en EEUU. De la misma manera Xavier *et al.* (2009) señala que los riesgos más elevados del uso de biosólidos (Clase A y B), parecen estar más relacionados a la salud ocupacional (riesgo del trabajador) de que a la salud del consumidor.

Y de acuerdo a las estimaciones de generación de lodos (Tabla 17, 18 y 19), en Tacna se producirían por los menos 2000 t/año (materia seca), y considerando que no se obtuvieron diferencias significativas en la evaluación de los lodos en el crecimiento de maíz, podríamos considerar la dosis más baja que se estudió, 25 t/ha, para lo cual se podrían abonar 80 hectáreas de terreno por año (sin tener en consideración el requerimiento de nutrientes del cultivo, y el no cumplimiento de la normativa del Lodo Copare). Al respecto Jurado *et al.* (2004) y Jurado, Arredondo, Flores, Olalde y Frías (2007) mencionan que la aplicación superficial de biosólidos puede contribuir al mejoramiento del suelo. Los principales beneficios incluyen una mayor disponibilidad de humedad y algunos nutrientes en el suelo, incremento de la producción. A pesar de las limitantes del uso de biosólidos como fertilizante, su uso podría ser una alternativa para mejorar las condiciones de baja fertilidad del suelo de la mayoría de las zonas áridas y semiáridas del país. Estas regiones presentan características adecuadas para la aplicación de biosólidos como: mantos freáticos profundos, suelos neutros y alcalinos, escasa precipitación pluvial, lo cual representa poco riesgo de contaminación de suelo y aguas superficiales y subterráneas. Este mismo autor, considera factible el aprovechamiento de biosólidos como abono

orgánico en cantidades moderadas de 5 a 45 t/ha (materia seca), en zonas áridas, como son las de la región costa de Tacna.

Al margen de todo esta temática, y al margen de la falta de normativa que regule el uso de los lodos residuales en los suelos ya sea como mejorador/acondicionador o abono, es urgente el desarrollo de proyectos de investigación sobre los efectos de los lodos en diferentes cultivos y otros ecosistemas, los cuales deberán ser multidisciplinarios para dar respuesta a los aspectos sociales, económicos, ecológicos y ambientales involucrados en dicho proceso.

Las normas extranjeras analizadas han considerado que el uso benéfico del lodo se promueve considerando tasas agronómicas según la especie vegetal, por cuanto se suministra la cantidad de nitrógeno necesaria para los cultivos o vegetación, minimizando fenómenos de lixiviación de nitratos que pasan más allá de la zona de raíces, por lo cual podemos tomarlas como base para un marco regulatorio propio. Por su parte Jurado *et al.* (2007) indican que la dosis adecuada dependerá de un análisis integral de los costos y beneficios de la aplicación de lodos, y el análisis final de sus

beneficios dependerá del monitoreo a largo plazo de las variables de suelos y la biodiversidad del ecosistema.

En el marco de la gestión ambiental, la cual según Vélez (2007) se entiende como un conjunto de operaciones encaminadas a dar a los residuos producidos el destino global más adecuado desde el punto de vista medioambiental, de acuerdo con sus características, volumen, procedencia, costo de tratamiento, posibilidades de recuperación, comercialización y normas jurídicas. En ese sentido, el mismo autor califica a los residuos como (a): asimilables a urbanos y (b): tóxicos y peligrosos, considerando a los lodos estabilizados o biosólidos como residuos asimilables a urbanos.

En este contexto, los lodos tratados que se obtienen en las plantas de tratamiento de aguas residuales, se pueden contemplar bajo dos puntos de vista: (1) Residuo urbano cuya eliminación es preciso gestionar; (2) Recurso de alto contenido orgánico y de otros elementos fertilizantes, susceptible de uso agrícola.

Esta doble faceta de residuo y recurso, evidencia la necesidad de investigar vías de utilización. El uso agrícola extensivo, garantiza una fácil eliminación. Sin embargo debemos considerar el aspecto ambiental puesto que pueden entrañar riesgos contaminantes por

metales pesados, patógenos, salinidad, nitrógeno lixiviado, etc. y pueden influir en la composición de los productos vegetales cosechados, modificando los niveles de determinados elementos, sobre todo de metales pesados. Por tanto la utilización agrícola de lodos de PTAR no consiste sólo en establecer estrategias técnico-económicas rentables, sino que hay que considerar a la vez el aspecto ambiental (los diversos tipos de contaminación de suelos y aguas) y el de calidad de los productos consumidos (metales pesados asimilados, contenido en nitratos, etc.) tanto en alimentación humana como en ganadería.

La problemática asociada a los biosólidos aparece cuando estos dejan de ser un producto para convertirse en un residuo. Por ello es preciso buscar tratamientos adecuados que permitan, preferentemente, una utilización racional de los citados biosólidos y solo en caso de ser inviable esta alternativa, proceder al procesado de los mismos como residuo de la forma más conveniente, tanto desde el punto de vista económico como ambiental. La importancia de una conveniente gestión de los biosólidos es fundamental para el funcionamiento de cualquier instalación de depuración (Mahamud, Gutiérrez y Sastre, 1996).

CONCLUSIONES

PRIMERA

En base a los resultados obtenidos, al análisis de la normativa nacional e internacional y aspectos técnico-ambientales, se puede decir que el lodo proveniente de la PTAR Copare no reúne las condiciones agronómicas ni sanitarias para su aplicación como abono en la agricultura; sin embargo el lodo proveniente de la PTAR Magollo, si bien no muestra condiciones óptimas en los parámetros agronómicos, tiene una concentración de metales pesados y contenido de patógenos, que hacen factible su uso en la agricultura.

SEGUNDA

Los lodos provenientes de las PTAR Copare y Magollo, mostraron contenidos de NPK y materia orgánica relativamente bajos, respecto a otros lodos indicados en la literatura. En cuanto a los metales pesados, el lodo de la PTAR Copare sobrepasa las concentraciones límites para arsénico (88,61 mg/kg), no siendo admisible para ninguna normativa a excepción de la europea que no establece límite para dicho contaminante; el mismo lodo sobrepasa también los límites para plomo (311,07 mg/kg),

no siendo admisible solo para la normativa brasilera (300 mg/kg); el lodo de la PTAR Magollo sobrepasa las concentraciones límites para arsénico (59,04 mg/kg), solo para la normativa brasilera (41 mg/kg) y chilena (20 a 40 mg/kg). Respecto al contenido de patógenos, acorde a las diferentes normativas a excepción de la europea, el lodo de la PTAR Copare sería clasificado como de Clase B, y el de la PTAR Magollo como de Clase A.

TERCERA

Acorde a la estimación y proyección de la generación de lodos residuales en las PTAR Copare y Magollo, en el año 2012 se produjeron de 2112,63 a 4384 t, pudiendo llegar a alcanzarse para el año 2020 entre 2331,32 a 5637,63 t de lodo, según la metodología en base al volumen de agua tratada y población respectivamente. Según las mediciones de los lodos en los lechos de secado, en ambas PTAR se tiene un total de 12 617,07 t, que corresponde solo a las lagunas en las cuales se removieron los lodos, no obstante si consideraríamos la totalidad de lagunas se tendría aproximadamente 31 903,70 t que correspondería a un período de generación de hasta 15 años.

CUARTA

En la evaluación del efecto de los lodos en el crecimiento de maíz (*Zea mays* L.) no se obtuvieron diferencias significativas en las diferentes dosis utilizadas para los parámetros altura de planta y diámetro de tallo. Sin embargo, se encontraron diferencias altamente significativas en los parámetros peso fresco, peso seco y porcentaje de materia seca; alcanzándose los mejores resultados con los tratamientos T₈ (Lodo Copare 100 t/ha), T₅ (Lodo Magollo 50 t/ha) y T₃ (Lodo Magollo 25 t/ha) para peso fresco; T₃ (Lodo Magollo 25 t/ha), T₉ (Lodo Magollo 100 t/ha) y T₁₀ (NPK) para peso seco; y T₉ (Lodo Magollo 100 t/ha), T₃ (Lodo Magollo 25 t/ha) y T₆ (Lodo Copare 75 t/ha) para porcentaje de materia seca. Para estos tres últimos parámetros el T₁ (Tierra agrícola) obtuvo los menores valores al margen de la diferencia estadística.

RECOMENDACIONES

PRIMERA

A DIGESA y los investigadores, realizar estudios exhaustivos de caracterización (metales pesados, patógenos, parásitos, materia orgánica, nutrientes, etc.) de lodos residuales que comprendan un período amplio de tiempo a fin de evaluar su variación estacional.

SEGUNDA

Es necesario que la EPS Tacna S.A. mejore el tratamiento de las aguas residuales en las PTAR de Copare y Magollo, en ese sentido debe remover periódicamente los lodos en las lagunas, y realizar un tratamiento de estabilización de los mismos para que de esa manera se obtenga un lodo de mejor calidad que tenga potencial de uso, asimismo debe registrar los volúmenes de lodos producidos en las PTAR con la finalidad de desarrollar una adecuada gestión ambiental de los mismos. Por otro lado debe tomar la administración de las pozas de tratamiento de Arunta, para así ejercer un seguimiento y control de los procesos y subproductos generados.

TERCERA

De considerarse la aplicación de los lodos en los suelos, se recomienda a los directivos encargados de “emitir permisos para el uso de lodos” y asociaciones de agricultores, no usar lodos de lecho de secado expuestos por un período de tiempo mayor de tres meses, ya que la alta radiación propia de la zona, altera varias de sus características benéficas. Además, no usar en la agricultura los lodos provenientes de la PTAR Copare, ya que tiene una alta concentración de arsénico, aunque en un futuro y en el marco de un mejor tratamiento de aguas residuales y de gestión de los lodos sería permisible su aplicación.

CUARTA

Al Ministerio de Ambiente del Perú y otras entidades involucradas, elaborar una norma específica para los lodos residuales, que regule su aplicación en los suelos como acondicionador o abono.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, E.; Martínez, K.; Planas, C.; Palacios, O.; Caixach, J.; Rivera, J. (2005). Priority organic pollutant assessment of sludges for agricultural purposes. *Chemosphere*, 61(9), 1358-1369. Abstract.
- Acevedo, E. (2004). *Valorización de lodos provenientes de tratamiento de aguas servidas como mejorador de suelos degradados*. Chile: Universidad de Chile/SAG.
- Acosta A., M. M. (2007). *Determinación de metales pesados en suelos agrícolas del valle del Mezquital, Hgo.* (Tesis Lic. Biología). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
- Acosta G., Y.; Ramírez, E. y Gutiérrez, E. (1996). *Efectos de la aplicación del lodo residual municipal sobre suelos y plantas*. Maracaibo, Venezuela: Universidad de Zulia.
- Agrhicol S.A.C. (2007). *Productos: Maíz híbrido XB 8010*. Recuperado de <http://agrhicol.com/web/productos.htm>
- Alcañiz B., J. M.; Ortiz P., O. y Carabassa C., V. (2008). *Utilització de fangs de depuradora en restauració: Manual d'aplicació en activitats extractives i terrenys marginals*. España: Generalitat de Catalunya.

- Andreoli, C. V.; De Lara, A. I.; Ferreira, A. C.; Bonnet, B. R. y Pegorini, E. S. (1998). A gestão dos biosólidos gerados em estações de tratamento de esgoto doméstico. *Engenharia e Construção*, 24, 18-22.
- Aller, F.; Otero, M.; Garzón, E. y Morán, A. (1999). Utilización de biosólidos en la agricultura. *MAPFRE Seguridad*, 75, 33-43.
- Allue, E. M. (1999). Aprovechamiento de los lodos en agricultura. *Agrotécnica*, 63-67.
- Ambientum. (2013). *Relación carbono nitrógeno*. Recuperado de <http://www.ambientum.com/enciclopedia/residuo/1.66.26.21r.html>
- Arca, M. (1970). *Manejo de suelos*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Barbarick, K. A. e Ippolito, J. A. (2000). Nitrogen fertilizer equivalency of sewage biosolids applied to dryland winter wheat. *Journal of Environmental Quality*, 29(4), 1345-1351. Abstract.
- Barbarika, A.; Sikora, L. y Colaccico, D. (1985). Factors affecting the mineralization of nitrogen in sewage sludge applied to soils. *Journal of Environmental Quality*, 49, 1403-1406. Abstract.

Barrios P., J. A. (2009). *Aspectos generales del manejo de lodos: Curso sobre manejo y aprovechamiento de lodos provenientes de plantas de tratamiento*. México, D. F.: Autor.

Bautista Z., F. (1999). *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados*. México: Universidad Autónoma de Yucatán.

Bifanni, P. (2007). *Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*. (1ra ed.). Guadalajara, México: Editorial Universitaria.

Boletín Oficial del Estado (BOE). (2001). *I Plan nacional de lodos de depuradora de aguas residuales - EDAR (PNLD) - (2001-2006)*. Recuperado de <http://www.miliarium.com/legislacion/aguas/estatal/resolucion14-06-01.asp>

Boletín Oficial del Estado (BOE). (2006). *II Plan nacional de lodos de depuradora de aguas residuales - EDAR (PNLD) - (2007-2015)*. Recuperado de http://sintacma.es/docs/borradorpnir_anexo5.pdf

Bonilla M., N. (2009). *Manual de recomendaciones técnicas del cultivo de maíz (Zea mays)*. San José, Costa Rica: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA).

- Callejas P., A. M. (2008). *Estudio del compostaje aeróbico como alternativa para la estabilización de lodos procedentes de una planta de tratamiento de aguas servidas de la región del Bío Bío*. (Tesis MSc. Ciencias de Recursos Naturales). Universidad de la Frontera, Temuco, Chile.
- Camargo, O. A. y Bettiol, W. (2000). Agricultura: opção animadora para a utilização de lodo de esgoto. *Agronómico Campinas*, 52(2/3), 13-16.
- Campos M., E.; García R., N.; Velásquez R., A. y García F., M. (2009). Análisis básico del reúso de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales en suelos de pradera del Parque Nacional Nevado de Toluca. *Redalyc Quivera*, 11(2), 35-51.
- Cardoso V., L. y Tomasini O., C. (s.f.). *Serie autodidáctica de medición de la calidad del agua, segunda parte: Características y efectos de los residuos peligrosos*. México: Comisión nacional del agua (CNA)/Instituto mexicano de tecnología del agua (IMTA).
- Carrington, E. G. (2001). *Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction*. Luxemburgo: European Commission.
- Castrejón, A.; Barrios, J. A.; Jiménez, B.; Maya, C.; Rodríguez, A. y González, A. (2001). *Evaluación de la calidad de los lodos residuales de México*. México: Universidad Autónoma del Estado de México.

Centro para el Desarrollo Agropecuario y Forestal, INC. (CEDAF). (1998).

Cultivo de maíz: Guía técnica N° 33-Serie cultivos. (1ra ed.). Santo Domingo, República Dominicana: Autor.

Cogger, C. y Sullivan, D. (2007). *Worksheet for calculating biosolids application rates in agriculture.* EEUU: Oregon State University.

Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). (2009). *Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas (DS N° 4/2009).* Chile: Ministerio de Secretaría General de la Presidencia.

Comunidad Económica Europea (CEE). (1986). *Directiva del Consejo de 12 de junio de 1986 relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de lodos de depuradora en agricultura (86/278/CEE).* Luxemburgo: Diario oficial de las comunidades europeas.

Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). (2006). *Resolução N° 375/2006: Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus productos derivados, e dá outras providências.* Brasil: Ministerio do Meio Ambiente.

Cruz N., O. F. (2013). *Manual para el cultivo de maíz en Honduras*. (3ra ed.). Tegucigalpa, Honduras: Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG)/Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria (DICTA).

Dáguer G., G. P. (2005). *Gestión de biosólidos en Colombia*. 46º Congreso Internacional de Sociedad, Ambiente y Futuro.

Del Carpio V., O. (2001). *Proyecto regional: "Sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en América Latina: realidad y potencial - Estudio general del caso"*. Tacna, Perú: IDRC - OPS/HEP/CEPIS.

Deras F., H. (2011). *Guía técnica: El cultivo del maíz*. El Salvador: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)/Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA).

Diez L., J. (2008). *Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas*. (Tesis Dr. Biología). Universidad de Santiago de Compostela, España.

Dorronsoro, C.; Martín, F.; Ortiz, I.; García, I.; Simón, M.; Fernández E. y otros. (2002). Migration of trace elements from pyrite tailings in carbonate soils. *Revista Environmental Quality*, 31, 829-835.

Durante I., M. D. (1990). *Comportamiento de los lodos de depuradora aplicados al suelo: Efecto barrera ante la contaminación*. Brasil: Universidad Federal de Río Grande do Norte.

EPS Tacna S.A. (2012a). *Plan estratégico 2013-2017*. (Documento N° 029-2012-400-EPS Tacna S.A). Tacna, Perú: Autor.

EPS Tacna S.A. (2012b). *Plan maestro optimizado actualizado 2013-2043*. Tacna, Perú: Autor.

Fassbender, H. W. y Bornemisza, E. (1994). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. (2da ed.). San José, Costa Rica: IICA.

Fayett O., D. (2008). *Optimización del proceso de secado solar para lodos residuales y cuantificación de metales pesados*. (Tesis Lic. Química). Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México.

Félix H., J. A.; Sañudo T., R. R; Rojo M., G. E.; Martínez R., R. y Olalde P., V. (2008). Importancia de los abonos orgánicos. *Revista Ra Ximhai*, 4(1), 57-67.

Flores M., J. P. (s.f.). *Uso de biosólidos y estiércoles en la nutrición vegetal*. México: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

- Francisco A., J.; Ramos M., P. y Aguirre Y., G. (2010). Aprovechamiento agrícola del lodo generado en la PTAR de Puente Piedra - Lima. *Revista de la Sociedad de Química del Perú*, 77(1), 75-85.
- García, I. y Dorronsoro, C. (2013). *Contaminación por metales pesados*. España: Universidad de Granada/Departamento de Edafología y Química Agrícola. Recuperado de <http://edafologia.ugr.es>
- García T., Z. M. (2012). *Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas*. (Tesis Ing. Sanitario). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Garrido V., S. (1993). *Interpretación de análisis de suelos*. (Hojas divulgadoras: Núm. 5/93 HD). España: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Generalitat Valenciana. (2008). *Lodos de depuración: Revisión y actualización del Plan Estratégico de Residuos*. España: Autor.
- Giraldo, O. y Lozano De Yunda, A. (2006). Efecto del secado de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales El Salitre (Bogotá) sobre su contenido de nutrientes, metales pesados y patógenos. *Agronomía Colombiana*, 24(2), 348-354.

Guisolfi, E. (2011). *Contenidos de materia orgánica: Relación con la fertilidad del suelo en siembra directa*. Argentina: Eduvim S.A.

Henríquez H., O. (2011). *Análisis y criterios mínimos para la aplicación de lodos tratados provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas en agrosistemas de la provincia de Melipilla, región metropolitana, Chile*. (Tesis MSc. Gestión y Planificación Ambiental). Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Hernández H., J. M.; Olivares S., E.; Villanueva F., I.; Rodríguez F., H.; Vásquez A., R. y Pissani Z., J. F. (2005). Aplicación de lodos residuales, estiércol bovino y fertilizante químico en el cultivo de sorgo forrajero (*Sorghum vulgare Pers.*). *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, 21(1), 31-36.

Hernández H., J. M. (2004). *Uso de lodos residuales procedentes de la ciudad de Durango y su efecto en la productividad y concentración de metales en sorgo forrajero (Sorghum vulgare Pers.)*. (Tesis Dr. Ciencias Agrícolas, Orientación Agua - Suelo). Universidad Autónoma de Nuevo León, Marín, México.

Hernández L., A. (2010). *Estudio comparativo de diferentes tecnologías de higienización de lodos de depuradora con fines para su reutilización*. (Tesis Dr. Ordenamiento del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente). Universidad Politécnica de Madrid, España.

Honorato P., R. (2000). *Manual de Edafología*. (4ta ed.). Chile: Alfaomega Grupo Editor S.A.

Inguanzo O., M. (2004). *Valorización energética y medioambiental de lodos de EDARs mediante pirolisis*. (Tesis Dr. Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente). Universidad de Oviedo, España.

Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2007). *Censo nacional de población y vivienda 2007*. Perú: Autor.

Jiménez, B.; Barrios, J. A. y Maya, C. (2000). *Estabilización alcalina de lodos generados en un tratamiento primario avanzado*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Jordán L., A. (2005). *Manual de edafología: Curso 2005-2006*. España: Universidad de Sevilla.

Julca O. A.; Meneses F., L.; Blas S., R. y Bello A., S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencias de uso en la agricultura. *IDESIA*, 24(1), 49-61.

Jurado G., P.; Luna L., M. y Barretero H., R. (2004). Aprovechamiento de biosólidos como abonos orgánicos en pastizales áridos y semiáridos. *Téc Pecu Méx*, 42(3), 379-395.

Jurado, P.; Arredondo, T.; Flores, E.; Olalde, V. y Frías, J. (2007). Efecto de los biosólidos sobre la humedad y los nutrimentos del suelo y la producción de forraje en pastizales semiáridos. *Terra Latinoamericana*, 25(2), 211-218.

Labrador M., J. (2001). *La materia orgánica en los agrosistemas*. (2da ed.). Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.

Leblanc, H. A.; Cerrato, M. E; Miranda, A. y Valle, G. (2007). Determinación de la calidad de abonos orgánicos a través de bioensayos. *Tierra Tropical*, 3(1), 97-107.

León S., G. (1995). *Protección sanitaria en el uso de aguas residuales y lodos de plantas de tratamiento*. Lima, Perú: CEPIS/OPS.

Leppe Z., A.; López A., A. y Nelson T., P. (2002). *Lodos provenientes de plantas de aguas servidas: potencialidades y restricciones; temores y realidades*. Chile: Autor.

Mahamud L., M.; Gutiérrez L., A. y Sastre A., E. (1996). Biosólidos generados en la depuración de aguas (I): Planteamiento del problema. España. *Ingeniería del agua*, 3(1), 47-62.

Mantis, I., Voutsas, D. y Samara, C. (2005). Assessment of the environmental hazard from municipal and industrial wastewater treatment sludge by employing chemical and biological methods. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 62(3), 397-407. Abstract.

Martin G., I.; Betancort R., J. R.; Salas R., J. J.; Peñate S., B.; Pidre B., J. R. y Sardón M., N. (2006). *Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población*. (1ra ed.). España: Centro de las nuevas tecnologías del agua/Instituto Tecnológico de Canarias.

Martínez De La Cerda., J.; Olivares S., E.; Salinas G., G.; Zavala G., F. y Aranda R., J. (2004). Efecto residual del lodo en trigo (*Triticum spp. L.*). *Oyton*, 237-242.

Martínez M., D. (s.f.). *Manual Teórico: Fisiología vegetal*. México: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla/Escuela de Biología.

Mateo S., J. J.; Bonifacio V., R.; Pérez R., S. R; Capulín G., J. y Mohedano C., L. (2011). Producción de *Cedrella odorata* L. en aserrín crudo con diferentes dosis de fertilización, en Tecpan de Galeana, Guerrero. *Revista Ra Ximhai*, 7(1), 194-204.

Matheus L., J.; Caracas, J.; Montilla, F. y Fernández, O. (2007). Eficiencia agronómica relativa de tres abonos orgánicos (vermicompost, compost y gallinaza) en plantas de maíz (*Zea mays* L.). *Agricultura Andina*, 13(1), 27-38.

Merli, G. F. y Ricciuti, N. O. (2009). *Microbiología de las aguas residuales - Aplicación de biosólidos en suelo*. (Seminario de procesos fundamentales físico-químicos y microbiológicos. Especialización y Maestría en Ingeniería Ambiental). Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.

Metcalf y Eddy, INC. (1995). *Ingeniería de aguas residuales (Vol. I): Tratamiento, vertido y reutilización*. (3ra ed.). Madrid, España: McGraw - Hill.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). (1990). *Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario*. España: BOE 262/1990.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2009). *Decreto por el cual se establece los criterios de calidad y uso para el aprovechamiento y disposición final de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales y se toman otras determinaciones*. (Borrador decreto). Colombia: Autor.

Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente. (2001). *Resolución 97/01: Apruébese el reglamento para el manejo sustentable de barros generados en plantas de tratamiento de efluentes líquidos*. Argentina: Secretaría de Desarrollo Sustentable y Política Ambiental.

Ministerio de Medio Ambiente. (2007). *Plan Nacional Integrado de Residuos, 2008-2015 (PNIR): Informe de Sostenibilidad Ambiental (ISA)*. España: Secretaría general para la prevención de la contaminación y del cambio climático.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2009). *Caracterización de los lodos de depuradoras generados en España*. España: Autor.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2011). *Norma OS. 090: Plantas de tratamiento de aguas residuales*. Perú: Autor.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006). *Plan Nacional de Saneamiento: 2006 - 2015*. Perú: Autor.

Miranda M., S. y Reyes A., S. (2005). *Análisis comparativo del uso de lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas servidas en la aplicación benéfica al suelo*. (Seminario Ing. Ejecución en Ambiente). Universidad de Santiago de Chile, Chile.

Monsalve, J.; Escobar, R.; Acevedo, M.; Sánchez, M. y Coopman, R. (2009). Efecto de la concentración de nitrógeno sobre atributos morfológicos, potencia de crecimiento radical y estatus nutricional en plantas de *Eucalyptus globulus* producidas a raíz cubierta. *Revista Bosque*, 30(2), 88-94.

Moreno C. J. y Moral H. R. (2008). *Compostaje*. (1ra ed.). Editorial Mundi - Prensa. México. 570 p.

Moreno R., A. (2007). *Elementos nutritivos: asimilación, funciones, toxicidad e indisponibilidad en los suelos*. España: Libros en Red.

Municipio de las Palmas de Gran Canaria. (2012). *Preinforme: estudio de valorización de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas (LEDARU)*. España: Universidad de las Palmas de Gran Canaria.

Muñoz A., C. Y. (2003). Mineralización de nitrógeno y carbono de compost de residuos del beneficiado del café. En: Meléndez, G. y Soto, G. (Eds.). *Taller de abonos orgánicos*. (pp. 84-106). Costa Rica: CATIE/GTZ/UCR/CANIAN.

Negrín B., A. y Jiménez P., Y. (2012). Evaluación del efecto agronómico del biosólido procedente de una planta de tratamiento por digestión anaerobia de residuales pecuarios en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Cultivos tropicales*, 33(2): 13-19.

Observatorio de Medio Ambiente. (2006). *El plan GIRA: El programa de lodos de depuradora*. Aragón, España: Autor.

Orama M., M. M. (2009). *Utilización de lodos sanitarios como alternativa energética*. (Tesis MSc. Ciencias en gerencia ambiental en evaluación y manejo de riesgo Ambiental). Universidad Metropolitana, San Juan, Puerto Rico.

Oropeza G., N. (2006). Lodos residuales: Estabilización y manejo. *Caos conciencia, 1*: 51-58.

Outwater, A. B. (1994). Reuse of sludge and minor wastewater residuals. Florida, EEUU: Lewis Publishers.

Pavón Ch., A. B. (2003). *Instalación de riego por goteo en una parcela de maíz*. (Proyecto fin de carrera Esp. Explotaciones agropecuarias). Universidad de Castilla - La Mancha, España.

Paz, C.; Henríquez, O. y Freres, R. (2007). Posibilidades de aplicación de lodos o biosólidos a los suelos del sector norte de la Región Metropolitana de Santiago. *Revista de Geografía Norte Grande, 37*: 35-45.

Pedroza M., M.; Vieira G., G. E.; Sousa F., J.; Pickler C., A.; Leal M., E. R. y Milhomen C., C. (2010). Produção e tratamento de lodo de esgoto - uma revisão. *Revista Liberato, 11(16)*: 147-157.

Porta, J.; López-Acevedo, M. y Poch, R. M. (2013). *Edafología: Uso y protección de suelos*. (3ra ed.). Madrid, España: Ediciones Mundi - Prensa.

Prieto M., J.; González R., C. A.; Román G., A. D. y Prieto G., F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1): 29-44.

Rámila G., J. I. y Rojas B., S. I. (2008). Alternativas de uso y disposición de biosólidos y su impacto en las tarifas de agua. (Seminario Ing. Comercial, mención Administración). Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Ramírez P., R.; Velásquez P., D. C. y Acosta B., E. (2007). Efecto de la aplicación de biosólidos en el crecimiento de *Jacaranda mimosifolia* (Gualanday) y en las condiciones físicas y químicas de un suelo degradado. *Revista Facultad de Agronomía*, 60(1): 3751-3770.

Rodríguez M., J. A. (2010). *Estudio comparativo de diferentes tecnologías de higienización de lodos de depuradora con fines para su reutilización*. (Tesis Dr. Ordenamiento del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

Rodríguez C., M. S.; Andrades, M. S.; Sánchez M., M. J. y Sánchez C., M. (2003). Efecto de la aplicación de lodos de aguas residuales al suelo en la persistencia del herbicida Linuron en condiciones de campo. En: Álvarez B., J. y Marinero, P. (Eds.). *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VI.* (pp. 349-354). España: Autor.

Romero R., J. A. (2004). *Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño.* (3ra ed.). Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Ruiz H., E. A. y Armienta H., M. A. (2012). Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, 28(2), 103-117.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (1993). *Norma Oficial Mexicana, que establece las características de los residuos peligrosos y el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.* (NOM-052-SEMARNAT-1993). México. 38 p.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2003). *Norma Oficial Mexicana - Protección ambiental, Lodos y biosólidos: especificaciones y límites permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.* (NOM-004-SEMARNAT-2002). México: Autor.

- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). (2012). *Manual de observaciones fenológicas*. Perú: MINAM/MINAG.
- Smith, S. E.; Christophersen, H. M.; Pope, S. y Smith, F. M. (2010). Arsenic uptake and toxicity in plants: integrating mycorrhizal influences. *Plant soil*, 327: 1-21.
- Sopper, W. E. (1993). *Municipal sludge use in land reclamation*. Washington D.C., EEUU: Lewis Publishers.
- Soto, G. y Meléndez, G. (2004). Cómo medir la calidad de los abonos orgánicos. (Hoja Técnica N° 48). *Manejo integrado de plagas y agroecología*, 72: 91-97.
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS). (2008). *Estudio: Diagnóstico situacional de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en las EPS del Perú y propuestas de solución*. Perú: GTZ/PROAGUA.
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS). (2012). *Las EPS y su desarrollo*. (Informe N° 211-2012/SUNASS-120-F). Perú: Autor.
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS). (2013). *Estudio tarifario: determinación de la fórmula tarifaria, estructura tarifaria y metas de gestión aplicable a la Entidad Prestadora de Servicios de Saneamiento Tacna Sociedad Anónima (EPS Tacna S.A.)*. Perú: Autor.

Terry B., C. C.; Gutiérrez D., J. B. y Abó B., M. (2010). *Manejo de aguas residuales en la gestión ambiental*. (1ra ed.). La Habana, Cuba: CIGEA.

Thompson, L. M. y Troeh, F. R. (2002). *Los suelos y su fertilidad*. (4ta ed.). España: Editorial Reverté.

Toro C., F. C. (2005). *Áreas potenciales para la aplicación de biosólidos en plantaciones forestales de la VI región de Chile*. (Memoria Ing. Forestal). Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Torres, P.; Madera, C. y Silva, J. (2009). Mejoramiento de la calidad microbiológica de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista EIA*, (1), 21-37.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). (1983). *Process design manual for land application of biosolids*. (EPA-625/1-83-016). Cincinnati, EEUU: Autor.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). (1993). *Part II. 40 CFR Parts 257, 403 and 503: Standards for the use or disposal of sewage sludge - Final rules*. EEUU: Autor.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). (1995). *A guide to the Biosolids Risk Assessments for the EPA Part 503 Rule*. (EPA/832-B-93-005). Washington D.C., EEUU: Office of Wastewater Management.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). (1999). *Biosolids generation, use, and disposal in The United States*. (EPA 530-R-99-009). Washington D.C., EEUU: Office of water.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2000). *Aplicación de biosólidos al terreno*. (Folleto informativo de tecnología de biosólidos: EPA 832-F-00-064). Washington D.C., EEUU: Office of Solid Waste.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2003). *Environmental regulations and technology: control of pathogens and vector attraction in sewage sludge*. (EPA/625/R-92/013). Cincinnati, EEUU: Autor.

Utria B., E.; Cabrera R., J. A.; Reynaldo E., I. M.; Morales G., D.; Fernández, A. M. y Toledo T., E. (2008). Utilización agraria de los biosólidos y su influencia en el crecimiento de plántulas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Revista Chapingo-Serie Horticultura*, 14(1), 33-39.

Vaca, R.; Villanueva, G.; Mejía, J.; Almazán, S.; González, P. y Velasco, E. (2002). *Calidad nutrimental en Zea mays cultivado en suelo acondicionado con lodo residual*. México: Universidad Autónoma del Estado de México.

Vargas T., Y. B. (2007). *Evaluación del contenido nutrimental del compost elaborado con tres tipos de desechos orgánicos y su efecto en el rendimiento del cultivo de brócoli (Brassica oleracea var. Italica plenk)*. (Tesis Ing. Agrónomo). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Varnero M., T.; Benavides, C. y Uribe, J. M. (1998). *Mejoramiento de la capacidad productiva del suelo mediante acondicionamiento con abonos orgánicos*. Santiago, Chile: Universidad de Chile/Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.

Vélez Z., J. A. (2007). Los biosólidos: ¿una solución o un problema? Medellín - Colombia. *Producción + Limpia*, 2(2), 57-71.

Xavier B., R. K.; Días B., P.; Ferreira D., G. M. y De Assis B., F. J. (2009). Análise crítica da legislação brasileira para uso agrícola de lodos de esgotos na perspectiva da avaliação quantitativa de risco microbiológico. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, 2(1), 143-159.

ANEXOS

A. Registros meteorológicos

Los datos meteorológicos para el presente trabajo (Tabla 28) fueron obtenidos de la estación meteorológica “Jorge Basadre” ubicada en la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, sede “Los Pichones”, y corresponden a los meses durante los cuales se condujo el ensayo del trabajo de investigación.

Tabla 28

Temperaturas promedio registradas en la estación meteorológica “Jorge Basadre” (Enero - Mayo, 2013).

Mes	Temperatura (°C)		
	Máximo	Mínimo	Media
Enero	27,6	16,4	22,0
Febrero	28,9	17,5	20,9
Marzo	27,1	16,0	21,6
Abril	24,3	12,8	18,0
Mayo	21,9	12,7	17,3
Promedio	26,0	15,1	19,9

Fuente: Estación meteorológica “Jorge Basadre”, Tipo convencional - meteorológica - SENAMHI - Tacna.

B. Estándares internacionales para concentración de metales y patógenos en lodos y suelos receptores

Tabla 29

Concentraciones máximas de metales pesados en lodos para aplicación al suelo (mg/kg de sólidos totales en base de materia seca).

Metal	Unión Europea ¹	España ²		EEUU ³		México ⁴		Brasil ⁵	Chile ⁶		Argentina ⁷	Colombia ⁸	
		Suelos con pH<7	Suelos con pH>7	Calidad excepcional	Concentración máxima	Excelentes	Buenos		Suelos	Suelos degradados		A	B
As	-	-	-	41	75	41	75	41	20	40	75	41	75
Ba	-	-	-	-	-	-	-	1300	-	-	-	-	-
Cd	20 - 40	20	40	39	85	39	85	39	8	40	20 - 40	39	85
Cr	-	1000	1500	1200	3000	1200	3000	1000	-	-	1000 - 1500	-	-
Cu	1000 - 1750	1000	1750	1500	4300	1500	4300	1500	1000	1200	1000 - 1750	1500	4300
Hg	16 - 25	16	25	17	57	17	57	17	10	20	16 - 25	17	57
Mo	-	-	-	18	75	-	-	50	-	-	-	75	75
Ni	300 - 400	300	400	420	420	420	420	420	80	420	300 - 400	420	420
Pb	750 - 1200	750	1200	300	840	300	840	300	300	400	750 - 1200	300	840
Se	-	-	-	100	100	-	-	100	50	100	-	36	100
Zn	2500 - 4000	2500	4000	2800	7500	2800	7500	2800	2000	2800	2500 - 4000	2800	7500

Fuente: (1) Directiva 86/278/CEE (CEE, 1986); (2) Real Decreto 1310/1990 (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación [MAPA], 1990); (3) 40 CFR Part 503 (USEPA, 1993); (4) NOM-004-SEMARNAT-2002 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2003); (5) Resolução Nº 375/2006 (Conselho Nacional do Meio Ambiente [CONAMA], 2006); (6) DS Nº 4/2009 (Comisión Nacional de Medio Ambiente [CONAMA], 2009); (7) Resolución 97/01 (Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente, 2001); (8) Propuesta de norma-borrador decreto (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2009).

Tabla 30

Concentraciones máximas de metales en suelo receptores de lodos (mg/kg de sólidos totales en base de materia seca).

Metal	España ²			Chile ³			Suelo INPREX (Tacna) ⁴
	Unión Europea ¹	Suelos	Suelos	Macrozona norte		Macrozona	
		con	con			sur	
		pH<7	pH>7	pH>6,5	pH≤6,5	pH>5	
As	-	-	-	20	12,5	10	50,6000
Cd	1 - 3	1	3	2	1,25	2	0,5470
Cr	-	100	150	-	-	-	13,1900
Cu	50 - 140	50	210	150	100	75	36,8400
Hg	1 - 1,5	1	1,5	1,5	1	1	0,2313
Ni	30 - 75	30	112	112	50	30	13,4700
Pb	50 - 300	50	300	75	50	50	21,7000
Se	-	-	-	4	3	4	1,2000
Zn	150 - 300	150	450	175	120	175	107,2000

Fuente: (1) Directiva 86/278/CEE (CEE, 1986); (2) Real Decreto 1310/1990 (MAPA, 1990); (3) DS N° 4/2009 (CONAMA, 2009); (4) Tabla 15 (IV. Resultados)

Tabla 31

Concentraciones máximas de parásitos y patógenos en lodos (sólidos totales en base de materia seca).

Parámetro	Unidad	EEUU ¹	México ²	Brasil ³	Chile ⁴	Argentina ⁵	Colombia ⁶
Coliformes fecales	NMP/g	Clase A: 1×10^3	Clase A: 1×10^3	Clase A: 1×10^3	Clase A: 1×10^3	Clase A: 1×10^3	Categoría A: 1×10^3
		Clase B: 2×10^6	Clase B: 1×10^3 Clase C: 2×10^6	Clase B: 1×10^6	Clase B: 2×10^6	Clase B: 2×10^6	Categoría B: 2×10^6
<i>Salmonella</i> sp.	NMP/g	Clase A: $3/4$	Clase A: 3 Clase B: 3 Clase C: 300	Ausencia en 10 g	Clase A: $3/4$	Clase A: $3/4$	Categoría A: $3/4$
		Clase A: $1/4$	Clase A: 1 Clase B: 10 Clase C: 35	Clase A: 0.25 Clase B: 10	Clase A: $1/4$	Clase A: $1/4$	Categoría A: $1/4$
Huevos de helmintos	HH/g	Clase A: $1/4$	Clase A: 1 Clase B: 10 Clase C: 35	Clase A: 0.25 Clase B: 10	Clase A: $1/4$	Clase A: $1/4$	Categoría A: $1/4$
Virus	UFP/g	Clase A: $1/4$	-	Clase A: 0.25	-	Clase A: Reducción del 99,9 % de la densidad de bacteriófago somáticos de <i>E.</i> <i>coli</i> ***	-

Fuente: (1) 40 CFR Part 503 (USEPA, 1993); (2) NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2003); (3) Resolução Nº 375/2006 (CONAMA, 2006); (4) DS Nº 4/2009 (CONAMA, 2009); (5) Resolución 97/01 (Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente, 2001); (6) Propuesta de norma-borrador decreto (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2009)

C. Datos y cálculos para la estimación de la generación total de lodos

Tabla 32

Tratamiento de aguas residuales.

Código	Siglas	Tipo	Volumen volcado a la red (m ³)	Volumen tratado de aguas servidas (m ³)	% de tratamiento			Tasa anual de crecimiento (%)*
					2011	2010	2009	
EPS								
012	Tacna	Grande	11 656 621	10 406 880	89,28	87,83	86,59	1,5
S.A.								

Fuente : SUNASS (2012) - Las EPS y su desarrollo.

* Tasa anual de crecimiento del porcentaje de tratamiento de aguas residuales, dato calculado

Tabla 33

Mediciones y cálculo de la cantidad de los lodos en los lechos de secado de la PTAR Copare.

Ancho (m)	Largo (m)	Espesor promedio (m)	Subtotal (m³)
28,50	40,50	0,60	692,55
28,00	18,00	0,25	126,00
15,30	13,00	0,35	69,62
28,00	5,00	0,20	28,00
40,00	46,50	0,40	744,00
18,00	8,00	0,40	57,60
33,00	3,00	0,30	29,70
30,00	10,00	0,30	90,00
112,00	95,00	0,40	4256,00
83,50	82,50	0,40	2755,50
Total (m³)			8848,97
Densidad (t/m³)			0,67
Total (t)			5887,51

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34

Mediciones y cálculo de la cantidad de los lodos en los lechos de secado de la PTAR Magollo.

Ancho (m)	Largo (m)	Espesor promedio (m)	Subtotal (m³)
3,00	208,00	0,10	62,40
6,00	35,00	0,23	48,30
6,00	30,00	0,20	36,00
17,00	6,00	0,25	25,50
3,00	13,00	0,30	11,70
3,00	30,00	0,20	18,00
3,00	5,00	0,15	2,25
4,50	30,00	0,25	33,75
3,50	13,00	0,25	11,38
7,00	17,00	0,20	23,80
7,00	30,00	0,30	63,00
3,00	30,00	0,30	27,00
3,00	28,00	0,30	25,20
5,00	15,00	0,30	22,50
56,00	25,50	0,80	1142,40
58,00	23,00	0,80	1067,20
72,50	15,50	0,80	899,00
63,00	126,70	0,80	6385,68
3,00	18,00	0,20	10,80
Total (m³)			9915,86
Densidad (t/m³)			0,68
Total (t)			6729,56

Fuente : Elaboración propia.

D. Datos promedio de los parámetros evaluados para determinar el efecto de los lodos en el crecimiento de plantas de maíz (*Zea mays*) (Ensayo).

Tabla 35

Promedio de las tres repeticiones para los parámetros altura de planta (cm) y diámetro de tallo de plantas de maíz a los 15, 30, 45 y 60 días después de la siembra.

Tratamientos	Descripción	Altura de planta (cm)				Diámetro de tallo (cm)			
		Días después de la siembra				Días después de la siembra			
		15	30	45	60	15	30	45	60
T ₁	0 t/ha (Tierra agrícola)	6,79	23,48	34,64	41,76	1,96	3,72	5,84	7,01
T ₂	25 t/ha Lodo Copare	6,45	19,66	32,76	39,54	2,01	3,18	5,27	6,59
T ₃	25 t/ha Lodo Magollo	8,60	24,21	42,81	54,24	2,14	3,99	8,11	9,52
T ₄	50 t/ha Lodo Copare	6,91	22,27	35,40	41,44	2,05	3,52	5,87	7,30
T ₅	50 t/ha Lodo Magollo	6,45	23,08	38,68	49,47	2,01	4,14	7,01	8,72
T ₆	75 t/ha Lodo Copare	7,52	22,09	35,10	44,00	2,07	3,50	6,08	7,73
T ₇	75 t/ha Lodo Magollo	5,93	21,10	32,52	37,60	2,02	3,96	6,26	7,85
T ₈	100 t/ha Lodo Copare	7,01	20,64	33,83	46,76	1,99	3,52	5,91	7,89
T ₉	100 t/ha Lodo Magollo	7,45	20,94	34,64	43,98	1,92	3,44	6,55	8,33
T ₁₀	Fertilizante inorgánico (NPK)	6,03	20,83	37,57	46,88	1,92	3,86	8,06	9,93

Fuente: Elaboración propia

Tabla 36

Promedio de las tres repeticiones para los parámetros peso fresco, peso seco y materia seca de plantas de maíz a los 60 días después de la siembra.

Tratamientos	Descripción	PF (g)	PS (g)	MS (%)
T ₁	0 t/ha (Tierra agrícola)	22,88	2,67	11,54
T ₂	25 t/ha Lodo Copare	32,25	12,05	37,50
T ₃	25 t/ha Lodo Magollo	45,00	23,67	52,87
T ₄	50 t/ha Lodo Copare	35,67	11,11	35,65
T ₅	50 t/ha Lodo Magollo	45,50	10,00	23,03
T ₆	75 t/ha Lodo Copare	27,17	12,92	48,23
T ₇	75 t/ha Lodo Magollo	40,17	18,00	45,61
T ₈	100 t/ha Lodo Copare	55,50	10,50	19,05
T ₉	100 t/ha Lodo Magollo	43,78	23,34	53,30
T ₁₀	Fertilizante inorgánico (NPK)	42,29	19,85	47,25

PF = Peso fresco; PS = Peso seco; MS = Materia seca

Fuente: Elaboración propia

E. Fotografías del ensayo



Figura 8. Vista general del ensayo al 09/04/2013.



Figura 9. Vista general del ensayo al 10/05/2013.

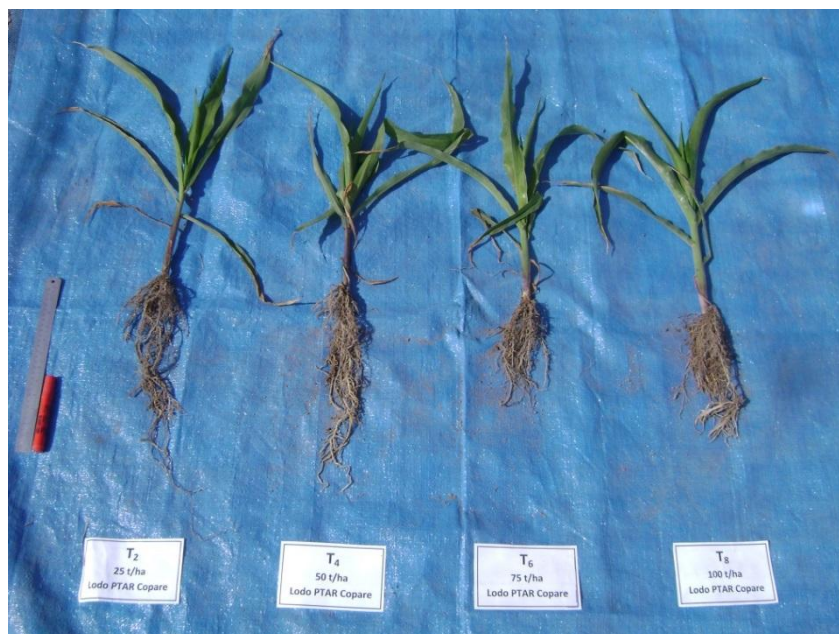


Figura 10. Lodo PTAR Copare: T₂ (25 t/ha), T₄ (50 t/ha), T₆ (75 t/ha) y T₈ (100 t/ha).



Figura 11. Lodo PTAR Magollo: T₃ (25 t/ha), T₅ (50 t/ha), T₇ (75 t/ha) y T₉ (100 t/ha).



Figura 12. Testigo T₁ (0 t/ha, Tierra agrícola), T₂ (25 t/ha, Lodo Copare), T₃ (25 t/ha, Lodo Magollo) y Testigo T₁₀ (NPK, 300-400-200).



Figura 13. Testigo T₁ (0 t/ha, Tierra agrícola), T₄ (50 t/ha, Lodo Copare), T₅ (50 t/ha, Lodo Magollo) y Testigo T₁₀ (NPK, 300-400-200).



Figura 14. Testigo T₁ (0 t/ha, Tierra agrícola), T₆ (75 t/ha, Lodo Copare), T₇ (75 t/ha, Lodo Magollo) y Testigo T₁₀ (NPK, 300-400-200).



Figura 15. Testigo T₁ (0 t/ha, Tierra agrícola), T₈ (100 t/ha, Lodo Copare), T₉ (100 t/ha, Lodo Magollo) y Testigo T₁₀ (NPK, 300-400-200).

F. Croquis del ensayo

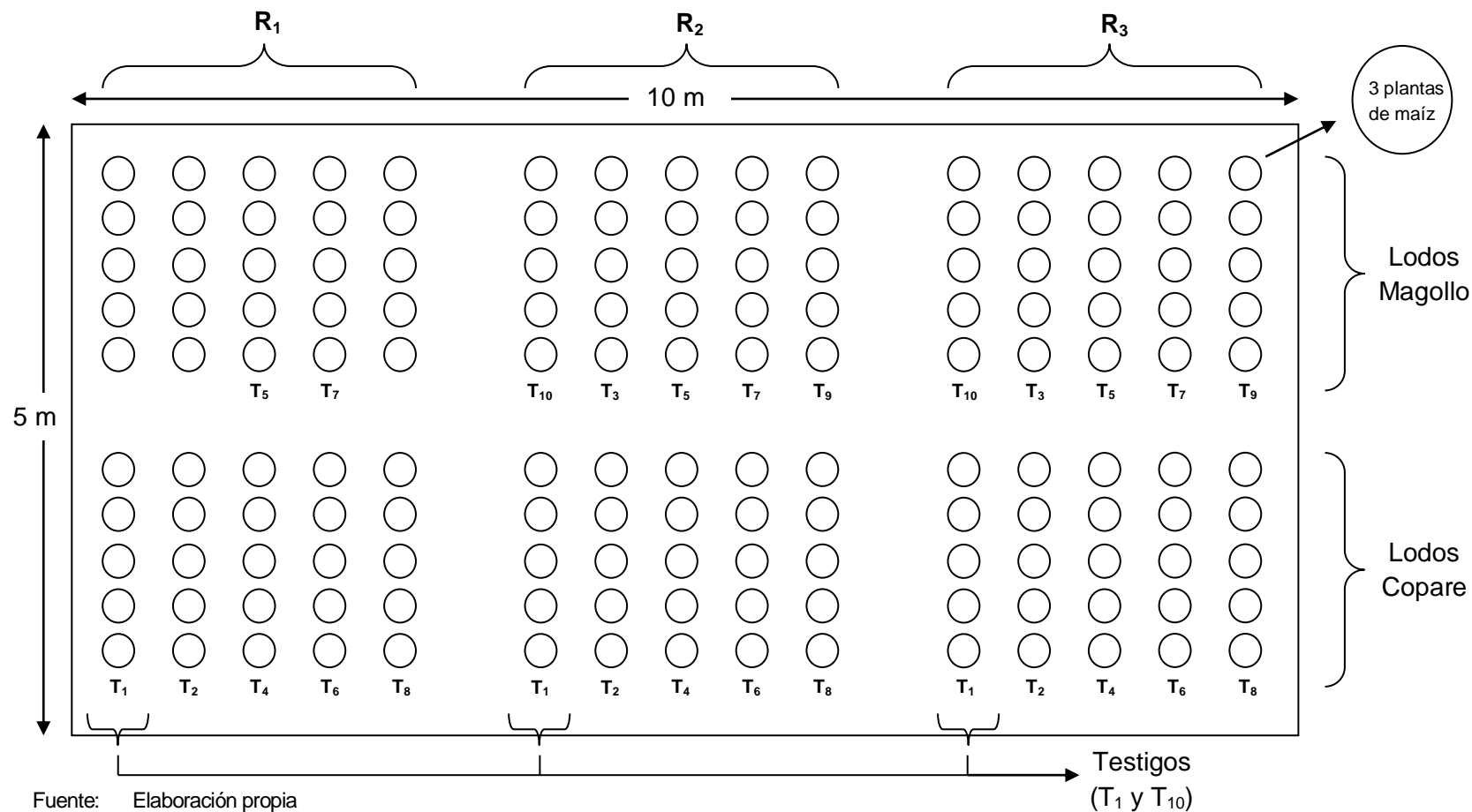


Figura 16. Croquis general del ensayo en el vivero del INPREX - Tacna.

G. Tablas de interpretación de análisis de suelos y abonos

Tabla 37

Tabla de interpretación de análisis de suelo para materia orgánica, fósforo y potasio.

Clasificación	Materia orgánica (%)	Fósforo disponible (ppm)	Potasio disponible (ppm)
Bajo	<2	<7	<100
Medio	2-4	7-14	100-240
Alto	>4	>14	>240

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF) - Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

Tabla 38

Tabla de interpretación de análisis de suelo para pH y salinidad.

Clasificación del suelo	pH	Clasificación del suelo	Salinidad - CE (es) (mmho/cm)*
Fuertemente ácido	<5,5	Muy ligeramente salino	<2
Moderadamente ácido	5,6-6,0	Ligeramente salino	2-4
Ligeramente ácido	6,1-6,5	Moderadamente salino	4-8
Neutro	6,6-7,0	Fuertemente salino	>8
Ligeramente alcalino	7,1-7,8		
Moderadamente alcalino	7,9-8,4		
Fuertemente alcalino	>8,5		

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF) - Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). (*) 1 mmho/cm = 1 dS/cm; CE (1:1) mmho/cm x 2 = CE (es) mmho/cm.

Tabla 39

Tabla de interpretación de análisis de suelo para carbonatos y cationes cambiables.

Clasificación	Carbonatos (%)	Sodio de cambio (meq/100 g)	Potasio de cambio (meq/100 g)	Calcio (meq/100 g)	Magnesio (meq/100 g)
Muy bajo	0-5	0,0-0,3	0,00-0,30	0,0-3,5	0,0-0,6
Bajo	5-10	0,3-0,6	0,30-0,60	3,5-10	0,6-1,5
Normal	10-20	0,6-1,0	0,60-0,90	10-14	1,5-2,5
Alto	20-40	1,0-1,5	0,90-1,50	14-20	2,5-4,0
Muy alto	>40	>1,5	1,50-2,40	>20	>4,0

Fuente: Rioja (2002) citado por Pavón (2003).

Tabla 40

Tabla de interpretación de análisis de suelo para CIC total.

CIC total (meq/100 g)	Nivel	Observaciones
0-10	Muy bajo	Suelo muy pobre; necesita un importante aporte de materia orgánica
10-20	Bajo	Suelo pobre; necesita aporte de materia orgánica
20-35	Medio	Suelo medio
35-45	Medio alto	Suelo rico
Mayor de 45	Alto	Suelo muy rico

Fuente: Garrido (1993).

Tabla 41

Contenidos de niveles óptimos para abonos orgánicos.

Clasificación	Nitrógeno (%)	Fósforo (%)	CIC (meq/100 g)	C:N
Nivel óptimo	>2	0,15-1,5	75-100	<20

Fuente: Paul y Clark (1996) citados por Soto y Melendez (2004).

H. Diagnóstico del sistema de alcantarillado

H.1 Ámbito de responsabilidad y demanda de agua potable y alcantarillado de la EPS Tacna S.A.

La población del ámbito de responsabilidad de la EPS Tacna S.A. (Provincia de Tacna; Distrito de Tacna, Distrito de Alto de la Alianza, Distrito de Ciudad Nueva, Distrito de Pocollay, Distrito de Gregorio Albarracín, Distrito de Pachía y Provincia de Jorge Basadre; Distrito de Locumba) muestra un crecimiento constante, toda vez que de 289 087 al 2012 se proyecta alcanzar a 320 381 habitantes al 2017, según datos del Plan Maestro Optimizado (PMO) (EPS Tacna, 2012a)

H.2 Cobertura del servicio de alcantarillado por localidad considerando el número de habitantes por conexión

La EPS Tacna (2012b), indica los siguientes datos:

Alcantarillado		Número de habitantes por vivienda
Tacna	87,7 %	3,84
Pachía	45,2 %	1,55
Locumba	72,4 %	3,85

H.3 Estimación de la demanda del servicio de alcantarillado

Las proyecciones relacionadas con los componentes de la demanda del servicio de alcantarillado en el ámbito de la EPS Tacna S.A. involucran a la población, conexiones y contribución al alcantarillado (Tabla 42) (EPS Tacna, 2012b).

Tabla 42

Proyección de demanda de alcantarillado por localidad 2012 - 2020.

Año	Tacna			Pachía			Locumba			Total EPS		
	Total de habitantes	Población servida		Total de habitantes	Población servida		Total de habitantes	Población servida		Total de habitantes	Población servida	
		%	Habitantes		%	Habitantes		%	Habitantes		%	Habitantes
2012	287 450	87,7	251 954	406	45,2	183	1 231	72,4	891	289 087	87,5	253 028
2013	293 532	87,0	255 373	403	45,0	181	1 277	73,0	932	295 212	86,9	256 486
2014	299 743	87,0	260 776	401	45,0	180	1 325	74,0	981	301 469	86,9	261 937
2015	305 978	87,0	266 200	398	45,0	179	1 373	75,0	1 030	307 749	86,9	267 409
2016	312 235	87,0	271 645	396	45,0	178	1 422	76,0	1 081	314 053	86,9	272 904
2017	318 516	87,0	277 109	393	45,0	177	1 472	77,0	1 133	320 381	86,9	278 419
2018	324 822	87,0	282 595	391	45,0	176	1 523	77,0	1 173	326 736	86,9	283 943
2019	331 150	96,0	317 904	388	45,0	175	1 575	77,0	1 213	333 113	95,9	319 292
2020	337 502	96,0	324 002	386	45,0	174	1 628	77,0	1 254	339 516	95,9	325 429

Fuente: EPS Tacna S.A. (2012b) – Plan maestro optimizado actualizado 2013-2043

H.4 Número de conexiones de alcantarillado

Las conexiones totales de alcantarillado ascienden a 68 600 distribuidos en las tres localidades de ámbito de administración de la EPS Tacna S.A. (Tabla 43) (EPS Tacna, 2012b).

Tabla 43

Distribución de conexiones de alcantarillado.

Localidad	Conexiones		Conexiones		Conexiones	
	totales	%	activas	%	inactivas	%
Tacna	68 252	99,49	63 555	92,65	4697	6,85
Pachía	122	0,18	98	0,14	24	0,03
Locumba	226	0,33	212	0,31	14	0,02
Total EPS	68 600	100	63 865	93,10	4735	6,90

Fuente: Base comercial de EPS Tacna S.A.

Se observa que del total de conexiones de alcantarillado, el 6,90 % se encuentran inactivas. Asimismo del total de conexiones activas de alcantarillado, el 92,95 %, pertenece a la categoría doméstica, el 5,67 % a la categoría comercial, el 0,79 % a la categoría estatal, 0,22 % a la categoría social y el 0,37 % a la categoría industrial (Tabla 44) (EPS Tacna, 2012b).

Tabla 44

Distribución de conexiones activas de alcantarillado por categoría de usuario.

Localidad	Social	Doméstico	Comercial	Industrial	Estatal	Total
Tacna	140	59 077	3 613	238	487	63 555
Pachía	0	89	3	0	6	98
Locumba	1	197	3	0	11	212
Total EPS	141	59 363	3 619	238	504	63 865

Fuente: Base comercial de EPS Tacna S.A.

H.5 Aspectos operacionales del servicio de alcantarillado

La EPS Tacna (2012b), señala lo siguiente:

- **Redes de alcantarillado**

La red de colectores, está conformada por tuberías con diámetros desde los 150 mm de diámetro hasta los 300 mm. Actualmente se tienen las siguientes longitudes de acuerdo a los diámetros indicados en la Tabla 45.

Tabla 45

Colectores secundarios existentes.

Diámetro (mm)	Longitud (m)
150	1 775
200	339 880
Total	341 655

Fuente: EPS Tacna (2012b)

El material empleado en la red de colectores secundarios es de concreto simple normalizado y tiene un funcionamiento aceptable. Los principales problemas que presentan son: el arenamiento, la acumulación de basuras y deterioro por su antigüedad, problemas que producen alteraciones en su funcionamiento, que se evidencian en atoros o aniegos, que son solucionadas con la asistencia de un equipo Hidrojet, proporcionado por el PRONAP.

- **Colectores, interceptores y emisores**

- **Colectores principales**

- La ciudad de Tacna actualmente evacua sus desagües empleando once colectores principales, denominados: Tarata, Industrial, Modesto Molina, A.B. Leguía, 2 de Mayo, Bolognesi, Circunvalación Sur, Tarapacá, P.J. Leguía, Vista Alegre y Cono sur, que se describen en la Tabla 46.

- **Interceptores**

- Actualmente existen 3 interceptores, denominados Interceptor Principal Nuevo, Antiguo y Cono Sur, que se describen en la Tabla 47.

- **Emisores**

- La ciudad de Tacna evacua sus desagües hacia dos plantas de tratamiento, empleando para ello 2 emisores, denominados Emisor Antiguo y La Yarada.

Tabla 46

Dimensiones de los colectores principales en la ciudad de Tacna.

Diámetro (mm)	Longitud (m)										
	Tarata	Industrial	Modesto Molina	A.B. Leguía	Av. 2 de Mayo	Av. Bolognesi	Circunvalación Sur	Tarapacá	P.J. Leguía	Vista Alegre	Cono Sur
200	2555,35	257,91	-	-	-	-	-	1386,68	-	381,71	-
250	617,23	899,23	-	-	449,44	-	-	3142,35	300,02	638,07	-
300	-	-	402,53	1549,78	410,44	-	-	589,95	1416,11	910,87	5168,37
350	246,21	175,08	758,16	827,31	-	1407,05	-	-	-	-	-
400	103,66	639,10	-	78,45	-	2648,74	794,31	-	1183,44	-	-
450	-	730,10	-	-	-	-	362,15	-	-	-	-
550	-	-	156,93	-	-	-	-	-	-	-	-
600	-	1566,44	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	3522,45	4267,86	1317,62	2455,54	859,88	4055,79	1156,46	5118,98	2899,57	1930,65	5168,37

Fuente: EPS Tacna (2012b)

Tabla 47

Interceptores existentes.

Interceptores	Díámetro (mm)	Longitud (m)	Sub-total	Total
Antiguo	650	1500,40	2704, 28	8361,97
	800	1203,88		
Nuevo	700	3790,14	3790,14	
Cono Sur	600	1661,81	1867,55	
	800	205,74		

Fuente: EPS Tacna (2012b)

I. Plantas de tratamiento de aguas servidas

La EPS Tacna S.A cuenta con dos plantas de tratamiento de aguas servidas: una de ellas es la planta de tratamiento de aguas servidas de Copare (PTAR Cono Sur), que se construyó y operó en 1975 como lagunas aireadas y que fue diseñada para tratar 150 L/s; sin embargo, actualmente viene operando a niveles entre 50 y 60 L/s. Actualmente, la planta de tratamiento Copare, se encuentra rodeada por habilitaciones urbanas formales y en proceso de formalización, todas posteriores a la construcción de dicha planta. La presión de los vecinos, algunos medios de prensa y de líderes políticos han coincidido en el cierre de esta planta, señalando como principal

factor la generación de olores. Temporalmente, la EPS ha decidido reducir el caudal de tratamiento a 60 L/s, con el fin de disminuir los olores y derivar el caudal a la planta de Magollo (Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento [SUNASS], 2013).

La otra planta es la PTAR de Magollo, que empezó a funcionar en 1996 y cuenta con seis módulos de lagunas de estabilización. Dos de ellos construidos en su primera etapa, dos se construyeron en su segunda fase, y dos en una tercera etapa. Cada módulo está compuesto por una laguna primaria y una laguna secundaria. Los seis módulos de la planta están en capacidad de tratar un total de 180 L/s. Sin embargo, actualmente vienen operando 320 L/s, caudal que recibe las aguas residuales que no ingresaron a la planta Copare (PTAR antigua) y lo procedente de otros sectores de la ciudad de Tacna (SUNASS, 2013).

Estas lagunas fueron diseñadas para permitir el uso de sus aguas con la categoría B dada por la OMS. Esto quiere decir, permitir el riego de bosques, cereales, árboles, forrajes y cultivos industriales (SUNASS, 2013).

Cabe señalar que existen además unas lagunas ubicadas en las faldas del Cerro Arunta, en el sector del Cono Sur, en las que no se practica el tratamiento (EPS Tacna, 2012b).

I.1 PTAR Copare

Según la EPS Tacna (2012b), la antigua planta de EPS Tacna S.A se comenzó a construir el año 1971 y se concluyó en 1973, entró a operar como facultativas el año 1974 y cuando se concluyeron las obras de electrificación, en febrero del año de 1975, comenzó a operar como lagunas aireadas. La planta se ubica al Sur Oeste de la ciudad de Tacna, en las proximidades del aeropuerto, y cuenta con dos módulos compuestas por lagunas aireadas y lagunas facultativas, las mismas que tratan aguas residuales drenadas por el Emisor Antiguo (Emisor que drena las aguas de la parte central, cono norte y este de la ciudad). En la actualidad esta planta cuenta con los siguientes componentes:

- **Cámara de rejás y medidor Parshall**

Las aguas residuales llegan a una cámara de rejás, a través de una tubería de 900 mm de diámetro, cuenta con dos rejás de 1,20 m de ancho y una profundidad de 2,77 m, separadas por medio de compuertas de manera que pueda

independizar su funcionamiento por razones de mantenimiento. Contigua a la cámara de rejillas se encuentra el medidor de caudal tipo Parshall de 0,915 m de garganta y 2,00 m de profundidad. El conjunto descrito se encuentra a unos 150 m de la planta de tratamiento y está totalmente cercado para impedir el acceso de personas extrañas, en la actualidad el referido cerco se encuentra en mal estado.

- **Tramo medidor Parshall - cámara de distribución (Buzón 1)**

Los primeros 100 m de recorrido a partir del medidor Parshall, las aguas servidas están canalizadas con tubería de concreto armado de 900 mm de diámetro. Luego, el conducto cambia a un canal abierto de 0,70 m de ancho por 1,25 m de altura con un recorrido de 68 m. Al final del canal se tiene una cámara de distribución (Buzón 1) que antiguamente podía derivar el caudal de llegada a las lagunas aireadas o a las lagunas facultativas; actualmente solo deriva las aguas a las lagunas aireadas al encontrarse inhabilitado la compuerta de derivación.

- **Canal distribuidor - repartidor R1 a las lagunas aireadas**

El canal se inicia en el buzón N° 1 y conduce las aguas residuales crudas a las lagunas aireadas. Antes de la estructura de ingreso a la primera laguna aireada, se cuenta con un distribuidor de caudal para cada una de las dos lagunas aireadas. Los primeros 68 m del canal tienen 0,70 m de ancho y los últimos 121 m tienen 0,35 m de ancho. Los ingresos a las lagunas aireadas son canales de 0,35 m de ancho y con una profundidad de 1,25 m.

- **Lagunas aireadas**

Cada una de las dos lagunas aireadas presenta las siguientes características:

- Forma: Cuadrada
- Largo: 110 m
- Ancho: 110 m
- Área: 1,2 ha
- Profundidad total: 5,5 m
- Profundidad efectiva: 4,5 m
- Talud: 1:3
- Revestimiento: losetones de concreto

Cada una de las lagunas cuenta en la salida con una pantalla de concreto de forma tronco piramidal, que se prolonga en 3,00 m por debajo de la superficie del agua. Uno de los lados de la pantalla se encuentra separado 16 m del canal de salida. Este canal tiene una longitud de 33,73 m.

Las lagunas aireadas están dotadas de cuatro aireadores verticales de 10 HP de potencia cada uno de ellos, con un peso promedio de 370 kg y están en capacidad de desplazar 5060 galones por minuto (320 L/s) y poseen una capacidad de transferencia de oxígeno bajo condiciones estándar de 1,54 kg O₂/hp-hora. La energía transmitida a la masa de agua es de 0,62 vatios/m³, lo cual lo califica en un estado intermedio entre la laguna facultativa con mezcla mecánica y laguna aireada facultativa. El sistema de inyección funciona de manera que el contenido del oxígeno disuelto en la masa de agua no sea menor a 1,0 mg/L ni mayor a 2,5 mg/L con un promedio de 1,5 mg/L.

- **Colector de las lagunas aireadas**

Los efluentes de las lagunas aireadas son colectados y conducidos al buzón 2 por medio de tuberías de concreto armado de 600 y 900 mm de diámetro con una longitud de

186,21 m. A partir del buzón N° 2 nace una nueva tubería de concreto armado de 600 mm de diámetro y que luego de 37,00 m de recorrido llega hasta el buzón 2B, continuando su recorrido en 7,00 m hasta descargar al canal distribuidor de las lagunas facultativas.

▪ **Canal distribuidor y repartidor R2 de las lagunas facultativas**

Antes de la estructura de ingreso a la primera laguna facultativa, se cuenta con un distribuidor de caudal, a cada una de las lagunas facultativas. Los primeros 29 m del canal tienen 0,70 m de ancho y los últimos 121 m tienen 0,35 m de ancho. Los ingresos a las lagunas facultativas son canales de 0,35 m de ancho y con una profundidad de 1,25 m.

▪ **Lagunas facultativas**

Conformada por dos lagunas facultativas, que presentan individualmente las siguientes características:

- Forma: cuadrada
- Largo: 110 m
- Ancho: 110 m
- Área: 1,2 Ha

- Profundidad total: 5,5 m
- Profundidad efectiva: 4,5 m
- Talud: 1:3
- Revestimiento: losetones de concreto

Cada una de las lagunas cuenta en la salida con una pantalla de concreto de forma tronco piramidal, que se prolonga en 3,00 m por debajo del nivel del agua. Uno de los lados de la pantalla se encuentra separado 16 m del canal de salida. El que tiene una longitud de 33,73 m.

- **Colector de las lagunas facultativas**

Los efluentes de las lagunas facultativas son colectados y conducidos al buzón 3 por medio de tuberías de concreto armado de 600 y 900 mm de diámetro en 185 m de longitud. A partir del buzón 3 nace una nueva tubería de concreto armado de 900 mm de diámetro y que luego de 100 m de recorrido llega hasta la cámara de contacto de cloro.

- **By - Pass**

El *by - pass* está constituido por dos tramos de tuberías de concreto armado de 600 mm de diámetro. El primer tramo comprendido entre el buzón N° 1 y el buzón N° 2, tiene una

longitud de 135 m cuya misión es derivar el agua residual cruda directamente a las lagunas facultativas, a la fecha este tramo no opera por haber sido sellada la boca de ingreso en el buzón N° 1. El tramo comprendido entre el buzón N° 2 y buzón N° 3, tiene una longitud de 145 m y deriva las aguas servidas tratadas en las lagunas aireadas directamente a la cámara de contacto de cloro.

- **Cámara de contacto de cloro**

La cámara de contacto de cloro es una estructura de concreto armado de 20,00 m de largo por 8,00 m de ancho con una altura de 1,80 m. El interior cuenta con pantallas verticales, separadas 2,00 m entre ellas y el espesor de todos los muros es de 0,20 m. Estas pantallas están construidas de tal manera que la cámara de contacto de cloro se asemeja a un floculador hidráulico de flujo horizontal. Los efluentes de las lagunas facultativas llegan a la cámara de contacto de cloro donde deben ser desinfectados antes de su disposición final al canal que conduce las aguas residuales tratadas hacia la Cooperativa Copare en donde es aprovechado en el riego de terrenos de cultivo dedicado a la siembra de maíz, alfalfa, camote, zapallos, etc.

- **Casa de control y laboratorio**

La casa de control y el laboratorio es una edificación construida de material noble y cuenta con siete ambientes destinados al laboratorio, controles eléctricos, oficina, almacén de cilindros de cloro, caseta de cloración, servicios higiénicos y taller, con un área techada de 159,39 m². En la actualidad estos ambientes están vacíos, sirviendo únicamente como caseta de guardianía y todas las paredes presentan rajaduras.

- **Área de drenaje**

La antigua planta de tratamiento de aguas residuales de Tacna, estará dirigido a tratar los desechos líquidos de las áreas de drenaje de los colectores Industrial, Molina, Leguía, Bolognesi y Circunvalación Sur, los mismos que serán conducidos por el Interceptor Antiguo hasta la referida planta de tratamiento.

- **Área reservada para la construcción de la planta de tratamiento**

El área reservada para la ampliación de la antigua planta de tratamiento de aguas residuales de EPS Tacna S.A. es de 15,0 ha, el mismo que se ubica contiguo al terreno que ocupa la actual planta de tratamiento.

▪ **Disposición**

Las lagunas están dispuestas en dos módulos, siendo cada uno compuesto por una laguna primaria y una secundaria, que operan en paralelo:

- Dimensiones en el fondo : 82*82 m
- Dimensiones en los bordes : 115*115 m
- Dimensiones en el espejo de agua : 110*110 m
- Inclinación de los taludes : H/V = 3/1
- Profundidad Útil : 4,6 m
- Profundidad total : 5,5 m
- Área superficial promedio unitario : 0,94 ha
- Volumen unitario : 43 295 m³
- Volumen útil : 42 400 m³
- Tiempo de Retención teórico : 14 días
- Revestimiento : losetas de concreto



Figura 17. Vista satelital de la PTAR Copare (Cono Sur).

I.2 PTAR Magollo

La EPS Tacna (2012b) indica que la planta de Magollo se ubica a 13 km al sur de la ciudad de Tacna, en la zona límite de Magollo y La Yarada y contigua a la carretera que va a la playa Boca del Río. Esta planta cuenta con seis módulos de lagunas de estabilización, dos de ellas construidas en una primera fase, dos en segunda fase y dos en la tercera fase. Cada módulo está compuesto por una laguna primaria y una laguna secundaria y a cada fase le corresponde lagunas de diferentes dimensiones. Esta planta recibe las aguas residuales excedente que no ingresan a la planta antigua y los

procedentes de las cuencas “K”, “I” y “M”, conducidos por el emisor Magollo.

- **Estructura de llegada**

La estructura de llegada se ubica al ingreso de la planta de tratamiento y es el lugar donde concluye el emisor e inicia el canal afluente con un ancho de 2,10 m. La obra está constituida por una caja de concreto dimensionada en función del caudal pico del año 2025. En la estructura de llegada se puede aplicar cloro, en los casos en que la presencia de olores sea notoria y afecte al medio ambiente.

- **Cámara de rejas**

Esta estructura tiene capacidad suficiente para tratar los caudales de la segunda etapa del proyecto es decir para el año 2025, está compuesta por un canal principal de 2,10 m de ancho y un canal By Pass de 1,75 m, con 7,40 m de largo. El canal de llegada tiene un ancho de 2,10 m. En el canal principal está instalado una reja de limpieza manual conformada por platinas de acero inoxidable de 2”x 1/4” espaciadas a 2,5 cm.

- **Medidor de caudal**

Las aguas cribadas y desarenadas son conducidas por un canal abierto de 2,10 m de ancho y pendiente de 10%

hasta el medidor de caudal tipo régimen crítico. Se trata de un medidor Palmer-Bowlus de 1,05 m de ancho de garganta. Aguas abajo del medidor de caudal, el canal se amplía a 2,10 m de ancho y conduce el agua residual hasta las lagunas. Las mediciones se pueden realizar directamente aguas arriba de la garganta porque carece de poza de medición. En el campo se ha podido verificar que existen deficiencias constructivas que pueden conllevar a errores en la medición de caudales.

- **Canal de distribución**

Después del medidor continúa el canal distribuidor con 2,10 m ancho hasta una distancia de 38 m, donde, se reduce a 1,20 m continuando con una longitud de 527,00 m hasta el punto final. En su recorrido este canal va distribuyendo las aguas servidas a las cuatro lagunas facultativas primarias que se encuentran en operación.

- **Lagunas de estabilización**

La planta tratamiento de aguas residuales de Magollo cuenta con seis módulos compuestos de lagunas

facultativas. En la Tabla 44, se indican las características principales de las referidas lagunas. De acuerdo con el cálculo de la capacidad de tratamiento, se ha determinado que cada uno de los dos módulos de la primera etapa pueden tratar 40 L/s, los dos siguientes de la segunda etapa 70 L/s y los dos de la tercera etapa 70 L/s, de esta manera, los seis primeros módulos de las lagunas de Magollo están en capacidad de tratar un total de 180 L/s.

Tabla 48

Características físicas de las lagunas existentes en la PTAR Magollo.

Lagunas	Dimensiones (m)		
	Largo	Ancho	Profundidad
Módulo 1 y 2			
Lagunas primarias	194,00	103,90	1,80
Lagunas secundarias	163,80	103,90	1,50
Módulo 3 y 4			
Lagunas primarias	270,80	113,85	2,00
Lagunas secundarias	312,50	85,65	2,00
Módulo 5 y 6			
Lagunas primarias	281,20	126,50	2,00
Lagunas secundarias	323,60	97,80	2,00

Fuente: EPS Tacna (2012b)

- **Canal de recolección**

Es un canal de concreto con 631,00 m de largo. Los anchos del canal varían a medida que aumenta el caudal del agua residual tratada, de tal manera, 217,00 m tienen 0,40 m de ancho, 180,00 m tienen 0,50 m, 158,00 m tienen 0,60 m y 76,00 m tienen 0,70 m. El canal recolector descarga en un canal de tierra de 344,00 m de largo, quien a su vez, conduce las aguas servidas tratadas hasta un canal de forma trapezoidal revestido con concreto. El canal trapezoidal tiene 0,98 m de base mayor, 0,50 m de base menor y 0,48 m de alto; con una longitud de 1974,00 m hasta los terrenos agrícolas del sector Magollo.

- **Disposición final**

Las aguas servidas tratadas en las lagunas de la planta Magollo son utilizadas para regar los terrenos agrícolas aledaños a la planta de tratamiento y del sector Magollo.

- **Área de drenaje**

La planta de tratamiento de agua residual de la Yarada estará destinada al acondicionamiento de los desechos líquidos de las áreas de drenaje del colector P.J. Leguía, interceptor Nuevo y del emisor La Yarada, los mismos que serán conducidos por el último hasta la referida planta de tratamiento.

Infraestructura de la I y II etapa de las Lagunas de estabilización de Magollo

	<i>I ETAPA</i>	<i>II ETAPA</i>
<i>Lagunas primarias</i>		
▪ Cantidad	2	2
▪ Largo	182,20 m	260 m
▪ Ancho	93,20 m	100,4 m
▪ Profundidad	1,80 m	2,00 m
▪ Área unitaria	1,70 ha	2,70 ha
▪ Volumen	30 566 m ³	54 080 m ³
▪ Periodo de retención	19,2 días	21,4 días
<i>Lagunas secundarias</i>		
▪ Cantidad	2	2
▪ Largo	156,20 m	260,00 m
▪ Ancho	94,40 m	75,00 m
▪ Profundidad	1,50 m	2,00 m
▪ Área unitaria	1,47 ha	2,25 ha
▪ Volumen	22 090 m ³	45 000 m ³
▪ Periodo de retención	13,9 días	17,8 días

Infraestructura de la III etapa de las Lagunas de Estabilización de Magollo

Lagunas primarias

▪ Caudal promedio aguas servidas a tratar	=	70 L/s
▪ Ancho promedio	=	104 m
▪ Largo promedio	=	260 m
▪ Tirante	=	2,00 m
▪ Área de cada laguna	=	2,70 ha
▪ Área total del tratamiento primario	=	5,41 ha
▪ Periodo de retención teórico	=	18 días
▪ Periodo de retención real	=	13 días
▪ Borde libre	=	0,5 m
▪ Talud típico paredes	=	1:4

Lagunas secundarias

▪ Caudal promedio aguas servidas a tratar	=	70 L/s
▪ Ancho promedio	=	75 m
▪ Largo promedio	=	300 m
▪ Tirante	=	2,00 m
▪ Área de cada laguna	=	2,25 ha
▪ Área total tratamiento Secundario	=	4,50 ha
▪ Período de retención Teórico	=	16 días
▪ Periodo de retención Real	=	12 días
▪ Borde libre	=	0,50 m
▪ Talud típico paredes	=	1:4

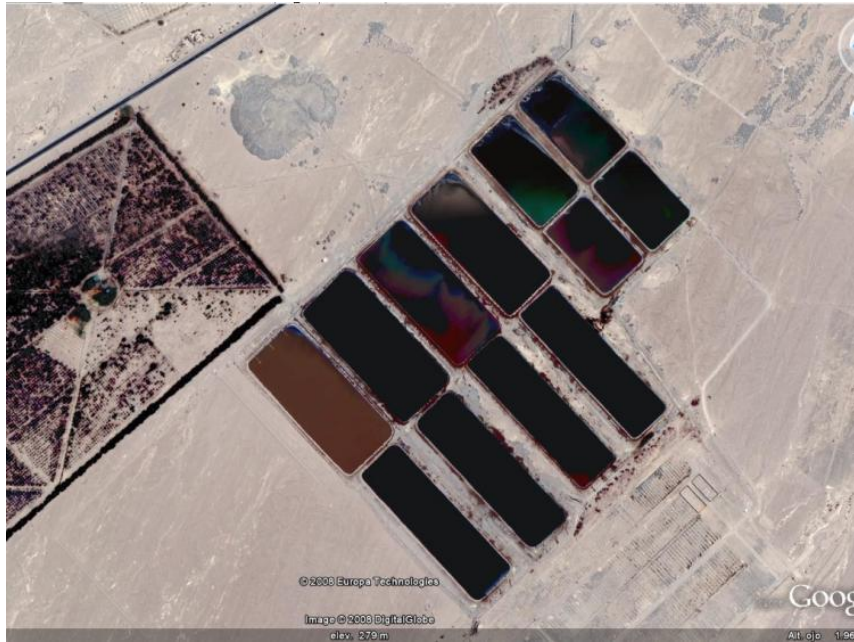


Figura 18. Vista satelital de la PTAR Magollo.

Gestiones para la “Ampliación de la PTAR Magollo”

En el año 2011, luego de varias visitas de funcionarios de la KFW de Alemania, y en el Marco del Convenio con el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, se ha logrado resultar beneficiario de la donación de los estudios para la ampliación de la PTAR Magollo, y un eventual financiamiento para la ejecución de la obra por un monto referencial de 16 millones de euros. Los fondos destinados a esta ampliación proceden del tesoro público de estado peruano y el alemán, para el mejoramiento de la infraestructura de tratamiento de

aguas residuales; siendo el Oficio N° 999-2012/Vivienda/VMCS/PNSU/1.0 de fecha 15 de marzo del presente, por el cual el Vice-ministerio de Construcción y Saneamiento comunica que la EPS Tacna S.A. ha sido beneficiaria en el “Programa Ambiental de Tratamiento de Aguas Residuales en Ciudades de Provincia”.

Posteriormente, en el mes de julio, el Director Ejecutivo del Programa Nacional de Saneamiento Urbano informó que ya se había logrado seleccionar cinco empresas internacionales para el proceso de licitación del perfil y factibilidad de la ampliación de la PTAR Magollo.

Durante, el segundo semestre del año 2012 no se ha tenido mayor información, no obstante se ha requerido al Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento el detalle del proceso de selección de consultor a través de oficio hasta en dos oportunidades.

I.3 Acciones implementadas para el mejoramiento del tratamiento

En el año 2012, se ejecutó el proyecto de limpieza y rehabilitación de 2 lagunas en PTAR Cono Sur y 4 lagunas en PTAR Magollo, con recursos propios de la EPS Tacna S.A. por un monto de S/ 800 000,00 nuevos soles. Durante los meses de marzo y junio del 2012 para la PTAR Copare y mayo y agosto del 2012 para la PTAR Magollo se realizó la evacuación de lodos acumulados en las 2 lagunas primarias de la PTAR Copare y las 4 lagunas de la primera etapa de la PTAR Magollo, posteriormente la recomposición de los taludes y fondo, compactación con arcilla y puesta en marcha. Como resultado, se logró mejorar la eficiencia parcial de la planta. Sin embargo, se encuentra pendiente la ejecución de la limpieza y rehabilitación de las siguientes ocho lagunas que conforman la segunda y tercera etapa de la PTAR Magollo y las dos lagunas secundarias de Copare.

Tabla 49

Análisis bacteriológicos de aguas residuales.

Punto de muestreo	Fecha	DBO 5 (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	Conductividad (uS/cm)	% de remoción de coliformes	Coliformes totales (NMP/100 ml)	Coliformes termotolerantes (NMP/100 ml)
<u>Octubre</u>								
PTAR								
Copare								
Afluente	26/10/12	436	840	7,36	1443		$4,9 \times 10^7$	$2,3 \times 10^7$
Efluente	26/10/12	70	370	7,35	1225	99,99	$1,3 \times 10^3$	$1,3 \times 10^3$
PTAR								
Magollo								
Afluente	28/10/12	570	917	7,20	1290		$9,4 \times 10^7$	$4,9 \times 10^7$
Efluente	28/10/12	95	318	7,45	1215	99,99	$7,0 \times 10^3$	$7,0 \times 10^3$
<u>Noviembre</u>								
PTAR								
Copare								
Afluente	12/11/13	574	804	7,40	1524		$2,6 \times 10^7$	$1,4 \times 10^7$
Efluente	12/11/13	87	370	7,90	1253	99,99	$1,4 \times 10^3$	$1,3 \times 10^3$
PTAR								
Magollo								
Afluente	12/11/13	634	955	7,20	1254		$7,9 \times 10^7$	$2,7 \times 10^7$
Efluente	12/11/13	106	308	7,50	1142	99,99	$4,9 \times 10^4$	$3,3 \times 10^4$
<u>Diciembre</u>								
PTAR								
Copare								
Afluente	18/10/12	660	640	6,92	1389		$7,9 \times 10^7$	$6,9 \times 10^7$
Efluente	18/10/12	89	178	7,21	1360	99,99	$3,3 \times 10^3$	$2,2 \times 10^3$
PTAR								
Magollo								
Afluente	18/10/12	626		7,20	1254		$9,4 \times 10^7$	$8,4 \times 10^7$
Efluente	18/10/12	90		7,33	1225	99,99	$4,6 \times 10^3$	$2,3 \times 10^3$
<u>Enero</u>								
PTAR								
Copare								
Afluente	07/01/13	574		7,12	1420		$4,9 \times 10^7$	$2,3 \times 10^7$
Efluente	07/01/13	89		7,55	1355	99,99	$1,3 \times 10^3$	$1,3 \times 10^3$
PTAR								
Magollo								
Afluente	07/01/13	615		7,05	1275		$9,4 \times 10^7$	$4,9 \times 10^7$
Efluente	07/01/13	93		7,74	1202	99,99	$7,0 \times 10^3$	$7,0 \times 10^3$
<u>Febrero</u>								
PTAR								
Copare								
Afluente	11/02/13	531		7,21	1411		$4,6 \times 10^7$	$1,8 \times 10^7$
Efluente	11/02/13	79		7,68	1387	99,99	$3,1 \times 10^3$	$1,8 \times 10^3$
PTAR								
Magollo								
Afluente	11/02/13	620		6,98	1288		$7,1 \times 10^7$	$6,3 \times 10^7$
Efluente	11/02/13	91		7,23	1232	99,99	$5,2 \times 10^3$	$4,7 \times 10^3$
<u>Marzo</u>								
PTAR								
Copare								
Afluente	18/03/13	517	925	7,11	1507		$4,9 \times 10^7$	$2,3 \times 10^7$
Efluente	18/03/13	82	341	7,35	1421	99,99	$2,7 \times 10^4$	$1,7 \times 10^4$
PTAR								
Magollo								
Afluente	18/03/13	536	941	7,20	1350		$3,4 \times 10^7$	$1,7 \times 10^7$
Efluente	18/03/13	95	368	7,57	1255	99,99	$7,0 \times 10^3$	$7,0 \times 10^3$

Fuente: EPS Tacna S.A. - Laboratorio de Control de Calidad, Informes mensuales