



Universidad Austral de Chile
Escuela de Acuicultura y Pesquerías

**ESTUDIO DE LODOS RESIDUALES DE PISCICULTURAS Y EVALUACION DE UN
PROCESO DE ESTABILIZACION E HIGIENIZACION PARA POTENCIAL
APLICACION EN SUELOS**

Profesor Patrocinante: **Dra. Sandra Madariaga Herrera**

Tesis para optar al título de **Ingeniero en
Acuicultura**

**FRANCISCO JAVIER TREUPIL ELIZALDE
PUERTO MONTT – CHILE**

2014

DEDICATORIA

Serás

Lo que

Quieres

Ser

A mis Padres,

A mis Hermanos,

A Nicole.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la profesora, Dra. Sandra Madariaga H., directora del proyecto FIC-R-Los Lagos-2012.BIP 30128388-0: “Tratamiento de lodos residuales de pisciculturas de la Región de Los Lagos y evaluación experimental de su desempeño en suelos”, por invitarme a participar en él y en la cual depositó toda su confianza para incorporar el equipo de trabajo. Gracias a esto pude adquirir nuevas competencias y a su vez integrar todo conocimiento adquirido durante el pasar por la Universidad Austral de Chile. Le agradezco además por su incondicional dedicación y tiempo brindado durante el periodo de desarrollo de este trabajo de titulación.

Agradezco al profesor, Dr. Jorge Vera quien fue la persona que estuvo involucrada en todo proceso del presente estudio. Además quiero agradecer a Mg. Sandra Marin quien reforzó los análisis estadísticos del presente trabajo, a Dr. Jorge Hernández que siempre estuvo a disposición de apoyar las actividades en el marco del proyecto y que compartió todo conocimiento para mejorar los escritos referente al proyecto de titulación. Quiero reconocer la importancia que tuvo Johnny Blanc S. en mi formación profesional y sus valores transmitidos.

Fundamental en el desarrollo del trabajo de titulación fue la empresa Marine Harvest Chile S.A a través de la Sra. Luisa Vidal, Jefe de Centro de la Ecopiscicultura Rio Blanco y don Antonio Cáceres, Jefe de Centro de Piscicultura Pichichanlelfu quienes siempre estuvieron a disposición de otorgar información e insumos para el presente estudio.

Finalmente agradezco al Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC, Región de Los Lagos) que permitió financiar el desarrollo de este trabajo de titulación.

RESUMEN

Se estudió el lodo residual generado en dos tipos de pisciculturas (de flujo abierto y de recirculación) dentro de la región de Los Lagos en base a sus propiedades físico – químicas y biológicas. Estos residuos corresponden básicamente al material fecal de los peces y restos de alimento no consumidos, los que son rescatados por filtros rotatorios en el tratamiento de aguas residuales, y luego acumulados y/o decantados en piscinas o en estanques. Además se evaluó un método de estabilización para este tipo de residuos mediante la digestión anaerobia en condición mesofílica (35 - 40°C), donde se buscó reducir el contenido de materia orgánica presente en el lodo residual. Se realizaron dos ensayos con distintas condiciones, el primer ensayo correspondió a un tratamiento de digestión anaerobia sin inóculo por un periodo de tiempo igual a 120 días. El segundo ensayo se preparó un inóculo con el objetivo de acelerar el proceso de digestión, por un periodo de 56 días de tratamiento anaerobio en condición mesofílica.

Los resultados obtenidos en el presente estudio demuestran que la digestión anaerobia es un método para reducir el contenido de materia orgánica en el lodo residual de ambas pisciculturas. Para el ensayo del tratamiento anaerobio sin inóculo la reducción de materia orgánica fue de 13,5% para piscicultura de flujo abierto y 16,2% para piscicultura de recirculación. El tratamiento anaerobio con inóculo la reducción de materia orgánica fue de un 12% para piscicultura flujo abierto y de un 19% para piscicultura recirculación.

Finalmente luego del tratamiento de digestión anaerobia el lodo residual se puede clasificar como clase A de acuerdo a la normativa de referencia en todo el periodo de estudio (DS04/09), y lodo no peligroso ya que esta higienizado de acuerdo a los resultados obtenidos.

ABSTRACT

The sludge was studied in two types of fish farming (open flow and recirculation) in Los Lagos region, based on their physicochemical and biological properties. These sludges are basically part to the fish fecal material and uneaten foods, which are rescued by rotating filters during the sewage treatment, accumulated and/ or decanted in fish farming as also in ponds.

Furthermore, a stabilization method was evaluated to this kind of sludges, through the anaerobic digestion in mesophilic conditions (35°C - 40°C) in digesters of stainless steel, with a capacity of 80 litres, where it sought to reduce the contents of organic matter present in the sludges. Two tests were done with different conditions. The first test was about the anaerobic situation treatment with the absence of inoculums during 120 days. The second test was done with inoculums, with the aim of accelerate the digestion process. This process lasted 56 days with anaerobic treatment in mesophilic condition.

The results obtained in this research show that the anaerobic digestion is a method utilized to reduce the organic matter contents in sludges of both piscicultures. For the anaerobic test with the absence of inoculums, the reduction of organic matter in open flow fish farming was 13.5%, and the reduction of organic matter in recirculation was 16.2%. The anaerobic treatment with inoculums showed an organic matter reduction of 12% in the open flow fish farming, and for the recirculation fish farming' the percentage was 19%

Finally after treatment of sewage sludge anaerobic digestion can be classified as a class A according to the reference standards throughout the study period (DS04/09), and non-hazardous sludge as this sanitized according to the results.

INDICE

Pág.

INTRODUCCION	1
HIPOTESIS	4
OBJETIVOS	4
1. Objetivo general	4
2. Objetivo específico	4
PROBLEMA ABORDADO	5
ANTECEDENTES GENERALES	7
1. Lodos residuales del cultivo del salmón	8
2. Ciclo productivo de pisciculturas	10
2.1 Fertilización	10
2.2 Incubación	11
2.3 Eclosión	12
2.4 Alevinaje	13
3. Tipos de pisciculturas	14
3.1 Piscicultura de flujo abierto	14
3.1.1 Tratamiento de lodos residuales en piscicultura de flujo abierto	14
3.2 Piscicultura de recirculación	15
3.2.1 Tratamiento de lodos residuales en piscicultura de recirculación	16
4. Normativa ambiental relevante para la industria salmonera	18
5. Métodos de estabilización para lodos residuales	19
6. Manejo y tratamiento de lodos residuales en pisciculturas	20
7. Aplicación de lodos residuales en suelos	20
8. Digestión anaerobia	23
8.1 Degradación anaerobia de la materia orgánica	23
8.2 Parámetros del proceso de la digestión anaerobia	26
8.2.1 Temperatura	26

8.2.2	Agitación.....	27
8.2.3	Potencial de Hidrógeno (pH)	27
8.3	Limitaciones asociadas con la digestión anaerobia.....	28
8.3.1	Arranque de los reactores anaerobios	28
8.3.2	Postratamientos	28
8.3.3	Otros factores	29
MATERIALES Y METODOS		30
1.	Área de estudio	30
2.	Extracción de lodos residuales	31
3.	Proceso de la digestión anaerobia.....	34
4.	Análisis de datos.....	37
RESULTADOS		38
1.	Caracterización del lodo residual crudo	38
1.1	Caracterización lodo residual crudo de piscicultura de flujo abierto	40
1.1.1.	Metales presentes en el lodo residual crudo	40
1.1.2	Componentes orgánicos presentes en el lodo residual crudo.....	40
1.1.3	Patógenos presentes en el lodo residual crudo.....	41
1.2	Caracterización lodo residual crudo de piscicultura de recirculación.....	42
1.2.1	Metales presentes en el lodo residual crudo	42
1.2.2	Componentes orgánicos presentes en el lodo residual crudo.....	42
1.2.3	Patógenos presentes en el lodo residual crudo.....	43
2	Análisis estadístico	44
3	Resultados de la digestión anaerobia en lodos residuales de piscicultura	53
3.1	Tratamiento de digestión anaerobia sin inóculo para lodos residuales crudos del mes de Marzo	56
3.1.1	Caracterización lodo residual digerido de piscicultura de flujo abierto	56
3.1.1.1	Metales presentes en el lodo residual digerido	56
3.1.1.2	Componentes orgánicos presentes en el lodo residual digerido	57
3.1.1.3	Patógenos presentes en el lodo residual digerido	58

3.1.2	Caracterización lodo residual digerido de piscicultura de recirculación	59
3.1.2.1	Metales presentes en el lodo residual digerido	59
3.1.2.2	Componentes orgánicos presentes en el lodo residual digerido	60
3.1.2.3	Patógenos presentes en el lodo residual digerido	61
3.2	Tratamiento de digestión anaerobia con inóculo para lodos residuales crudos del mes de Septiembre	62
3.2.1	Caracterización de lodo residual digerido para piscicultura de flujo abierto.....	62
3.2.1.1	Metales presentes en el lodo residual digerido	62
3.2.1.2	Componentes orgánicos presentes en el lodo residual digerido	63
3.2.1.3	Patógenos presentes en lodo residual digerido	64
3.2.2	Caracterización de lodo residual digerido para piscicultura de recirculación ...	65
3.2.2.1	Metales presentes en el lodo residual digerido	65
3.2.2.2	Componentes orgánicos presentes en el lodo residual digerido	66
3.2.2.3	Patógenos presentes en lodo residual digerido	67
DISCUSION	.....	69
CONCLUSION	.....	76
GLOSARIO	.....	77
BIBLIOGRAFIA	.....	80
LINKOGRAFIA	.....	83
ANEXOS	.....	84

INDICE FIGURAS

Pág.

Figura N° 1: Catastro de sitios de disposición final de residuos, MIDEPLAN, Encuesta CASEN, 2009. Ministerio del Medio Ambiente.	5
Figura N° 2: Tipos de pisciculturas en Chile.	7
Figura N° 3: Total lodos generados por región en Chile (SalmonChile-Intesal, 2012).	7
Figura N° 4: Origen de lodo residual en el cultivo del salmón.	8
Figura N° 5: Relación de producción del lodo residual.	8
Figura N° 6: Flujograma de nutrientes en el pez (Buschmann, 2001).	9
Figura N° 7: Fertilización de ovas con gametos masculinos.	10
Figura N° 8: Incubación de ovas fertilizadas.	11
Figura N° 9: Eclosión de ovas.	12
Figura N° 10: Cambios físicos y biológicos del salmón.	13
Figura N° 11: Área para el manejo y tratamiento de lodos residuales en piscicultura de flujo abierto.	14
Figura N° 12: Diagrama de flujo en piscicultura de flujo abierto.	15
Figura N° 13: Área para el manejo y tratamiento de lodos residuales en piscicultura de recirculación.	16
Figura N° 14: Diagrama flujo en piscicultura de recirculación.	17
Figura N° 15: Métodos de estabilización para lodos residuales (Metcalf y Eddy Inc, 2003).	19
Figura N° 16: Degradación biológica de la materia orgánica.	23
Figura N° 17: Etapas de la digestión anaerobia (Romero, 2002).	25
Figura N° 18: Ubicación de pisciculturas en estudio.	30
Figura N° 19: Estanque de decantación en piscicultura de flujo abierto.	33
Figura N° 20: Conos de sedimentación en piscicultura de recirculación.	33

Figura N° 21: Laboratorio de lodos acuícolas, UACH Puerto Montt.....	34
Figura N° 22: Digestores para el proceso anaerobio.....	35
Figura N° 23: Estructura de agitación para digestores anaerobios.....	35
Figura N° 24: Sistema de digestión anaerobia, UACH Puerto Montt.	36
Figura N° 25: Estructura de digestión anaerobio.	36
Figura N° 26: Variabilidad promedio (n=3) de metales en el lodo residual de piscicultura de flujo abierto.....	44
Figura N° 27: Variabilidad promedio (n=3) de Fósforo total y Nitrógeno total en el lodo residual de piscicultura de flujo abierto.	45
Figura N° 28: Variabilidad promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad en el lodo residual de piscicultura de flujo abierto.....	46
Figura N° 29: Variabilidad promedio (n=3) de metales en el lodo residual crudo de piscicultura de recirculación.....	47
Figura N° 30: Variabilidad promedio (n=3) de Fósforo total y Nitrógeno total en el lodo residual crudo de piscicultura de recirculación.	48
Figura N° 31: Variabilidad promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad en el lodo residual crudo de piscicultura de recirculación.	49
Figura N° 32: Comparación de la concentración promedio (n=3) de metales del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento sin inóculo para piscicultura de flujo abierto.	56
Figura N° 33: Comparación de la concentración promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento sin inóculo para piscicultura de flujo abierto.	57
Figura N° 34: Comparación de la concentración promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento sin inóculo para piscicultura de flujo abierto.	58
Figura N° 35: Comparación de la concentración promedio (n=3) de metales del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento sin inóculo para piscicultura de recirculación.....	59

Figura N° 36: Comparación de la concentración promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento sin inóculo para piscicultura de recirculación.	60
Figura N° 37: Comparación de la concentración promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento sin inóculo para piscicultura de recirculación.	61
Figura N° 38: Comparación de la concentración promedio (n=3) de metales del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento con inóculo para piscicultura de flujo abierto.	62
Figura N° 39: Comparación de la concentración promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento con inóculo para piscicultura de flujo abierto.	63
Figura N° 40: Comparación de la concentración promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento con inóculo para piscicultura de flujo abierto.	64
Figura N° 41: Comparación de la concentración promedio (n=3) de metales del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento con inóculo para piscicultura de recirculación.	65
Figura N° 42: Comparación de la concentración promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento con inóculo para piscicultura de recirculación.	66
Figura N° 43: Comparación de la concentración promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento con inóculo para piscicultura de recirculación.	67
Figura N° 44: Comparación de la concentración promedio (n=3) de Materia orgánica del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento con y sin inóculo para piscicultura de flujo abierto y recirculación.	68
Figura N° 46: Extracción del lodo residual crudo en piscicultura de flujo abierto.	86
Figura N° 47: Extracción del lodo residual crudo en piscicultura de recirculación.	87
Figura N° 48: Extracción de lodo residual del digestor anaerobio.	89
Figura N° 49: Activación de Biowish.	91

Figura N° 50: Determinación de sólidos volátiles.	93
Figura N° 51: Filtrado del lodo residual crudo.	96
Figura N° 52: Lodo residual filtrado con agua destilada.	96
Figura N° 53: Variación promedio (n=3) de metales presentes en el alimento suministrado en piscicultura de flujo abierto.	98
Figura N° 54: Variación promedio (n=3) de Fósforo total y Nitrógeno total presentes en alimento suministrado en piscicultura de flujo abierto.	99
Figura N° 55: Variación promedio (n=3) de metales presentes en alimento suministrado en piscicultura de recirculación.	100
Figura N° 56: Variación promedio (n=3) de Fósforo total y Nitrógeno total presentes en el alimento suministrado en piscicultura de recirculación.	101
Figura N° 57: Variación promedio (n=3) de la Materia orgánica presentes en el alimento suministrado en piscicultura de flujo abierto y de recirculación.	102

INDICE TABLAS

Pág.

Tabla N° 1: Normativa ambiental relevante para industria del salmón.....	18
Tabla N° 2: Concentración promedio (n=3) de metales (mg/kg base seca) en el lodo residual crudo de piscicultura de flujo abierto.	40
Tabla N° 3: Contenido promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) (g/kg base seca) en el lodo residual crudo de piscicultura de flujo abierto.	40
Tabla N° 4: Contenido promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad expresados en porcentaje (%) en el lodo residual crudo de piscicultura de flujo abierto.....	40
Tabla N° 5: Concentración promedio (n=3) de patógenos presentes en el lodo residual crudo de piscicultura de flujo abierto.	41
Tabla N° 6: Concentración promedio (n=3) de metales (mg/kg base seca) en el lodo residual crudo de piscicultura de recirculación.	42
Tabla N° 7: Contenido promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) (g/kg base seca) en el lodo residual crudo de piscicultura de recirculación.	42
Tabla N° 8: Contenido promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad expresados en porcentaje (%) en el lodo residual crudo de piscicultura de recirculación.	42
Tabla N° 9: Concentración promedio (n=3) de patógenos presentes en el lodo residual crudo de piscicultura de recirculación.	43
Tabla N° 10: Test Kruskal-Wallis.	50
Tabla N° 11: Test Mann-Whitney.	51
Tabla N° 12: Comparación de la concentración promedio (n=3) de metales (mg/kg base seca) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de flujo abierto.	56
Tabla N° 13: Comparación en el contenido promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) (g/kg base seca) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de flujo abierto.	57
Tabla N° 14: Comparación en el contenido promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad expresados en porcentaje (%) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de flujo abierto.	58

Tabla N° 15: Comparación de la concentración promedio(n=3) de patógenos entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de flujo abierto.	58
Tabla N° 16: Comparación de la concentración promedio(n=3) de metales (mg/kg base seca) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de recirculación.	59
Tabla N° 17: Comparación en el contenido promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) (g/kg base seca) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de recirculación.	60
Tabla N° 18: Comparación en el contenido promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad expresados en porcentaje (%) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de recirculación.	61
Tabla N° 19: Comparación de la concentración promedio (n=3)de patógenos entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de recirculación.	61
Tabla N° 20: Comparación de la concentración promedio (n=3) de metales (mg/kg base seca) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de flujo abierto.	62
Tabla N° 21: Comparación en el contenido promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) (g/kg base seca) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de flujo abierto.	63
Tabla N° 22: Comparación en el contenido promedio (n=3)de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad expresados en porcentaje (%) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de flujo abierto.	64
Tabla N° 23: Comparación de la concentración promedio (n=3) de patógenos entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de flujo abierto.	64
Tabla N° 24: Comparación de la concentración promedio (n=3) de metales (mg/kg base seca) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de recirculación.	65
Tabla N° 25: Comparación en el contenido promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) (g/kg base seca) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de recirculación.	66
Tabla N° 26: Comparación en el contenido promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad expresados en porcentaje (%) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de recirculación.	67

Tabla N° 27: Comparación de la concentración promedio (n=3) de patógenos entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de recirculación.	67
Tabla N° 28: Propiedades del lodo residual crudo (mg/kg base seca) en piscicultura de flujo abierto y de recirculación.	104
Tabla N° 29: Concentración máxima (mg/kg base seca) de metales en lodos para aplicación al suelo.	106
Tabla N° 30: Concentración máxima (mg/kg base seca) de metales en suelo receptor.	108

INTRODUCCION

La industria salmonera en Chile experimentó un rápido crecimiento en los últimos 20 años, pasando de una producción de 24 mil toneladas en el año 1990 a 657 mil toneladas en el año 2008, lo cual consolidó a Chile como el segundo país productor de salmónidos a nivel mundial después de Noruega (SalmonChile, 2012). Sin embargo, el gran auge de la salmonicultura en Chile cayó en crisis el año 2007 tras la irrupción del virus ISA. Esta crisis, que duró hasta el año 2010, provocó una caída del 20% de las exportaciones de salmónidos, obligando a la industria del salmón a implementar una serie de medidas de bioseguridad, entre las que destacan, el manejo de la mortalidad, desinfección de los efluentes de las plantas de procesos y centros de matanzas y la definición de áreas o barrios que operen de manera independiente unas de otras. Esto permite crear barreras sanitarias, de tal manera que el brote de una eventual nueva enfermedad afecte solo a la zona donde ésta se inició.

El ciclo productivo del salmón consta de tres etapas: una primera etapa que comprende desde la fecundación de ovas hasta la producción de alevines, que se desarrolla en pisciculturas de agua dulce. Posteriormente una etapa de esmoltificación y finalmente una tercera etapa de engorda, que se desarrolla en centros de cultivos de agua mar. Los cultivos permanecen en pisciculturas de agua dulce entre 8 a 12 meses, representando aproximadamente el 60% del ciclo productivo del salmón. Estas instalaciones tienen por objetivo el cultivo de peces bajo condiciones controladas y lo que comprende particularmente es el control de su crecimiento en las primeras etapas del ciclo.

La actividad productiva en pisciculturas genera diariamente materiales residuales, comúnmente denominados “lodos”, proveniente de los estanques de cultivo. Estos residuos

corresponden básicamente al material fecal de los peces y restos de alimento no consumido, los que son rescatados por filtros rotatorios en el tratamiento de aguas residuales, acumulados y/o decantados en piscinas, así como también en estanques.

Debido a que a nivel mundial, se proyecta que para el año 2015 la demanda por salmónidos se incrementará en un 40% se considera que la producción de lodos residuales podría potencialmente aumentar, debido al aumento en el número de pisciculturas para dar respuesta a tal demanda (SalmonChile, 2012).

Las pisciculturas manejan sus lodos de acuerdo a la reglamentación vigente en Chile (DS594/99), cuya reglamentación exige que los residuos (lodos) que son generados en las instalaciones deben ser dispuestos en sitios de disposición final (vertederos) que cumplan con las mínimas condiciones sanitarias que establece la autoridad. La preocupación tanto de agentes públicos como de privados y la necesidad de disminuir la carga en vertederos, ha llevado a estudiar e investigar los lodos residuales de pisciculturas, demostrando que podrían ser aplicados al suelo dada las propiedades benéficas para estos.

De acuerdo al Decreto Supremo N°4 del año 2009 (Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas (DS04/09)) que regula la aplicación y tratamiento de lodos sanitarios, las condiciones para que un lodo pueda ser aplicado al suelo debe cumplir con ciertas características de estabilización e higienización, el cual tiene por objetivo reducir la presencia de patógenos (coliformes fecales, *salmonella sp.*) y parásitos (ovas de helminto), disminuir olores desagradables y reducir la atracción de vectores sanitarios (disminución de sólidos volátiles).

Para cumplir con este propósito de estabilización de lodos residuales de piscicultura, desde el punto de biológico y químico, el proceso conocido como digestión anaerobia se presenta como una buena alternativa para el tratamiento de este tipo de residuos. La digestión anaerobia es un proceso que se basa básicamente en la degradación de la materia orgánica por bacterias facultativas y anaerobias obligadas (Appels *et al.*, 2008; Mshandete *et al.*, 2005; Novak *et al.*, 2003), ampliamente usado para la estabilización de lodos residuales. Comúnmente, la digestión anaerobia se efectúa en uno de las tres condiciones de temperatura: termofílico (45-65°C), mesofílico (25-45°C) y psicofílico (10-25°C).

En esta tesis se propone el estudio del lodo residual de piscicultura comprendido entre el desove y alevinaje de salmónidos, provenientes de dos tipos de pisciculturas (de flujo abierto y de recirculación) ubicadas en la región de Los Lagos, con el propósito de caracterizar y comparar los lodos residuales en base a sus propiedades físico - químicas y biológicas. Además evaluar la eficiencia de digestión anaerobia que tiene sobre estas propiedades.

Los resultados de este estudio permitirán conocer las propiedades de los lodos residuales provenientes de dos tipos de pisciculturas, en función al tipo de tratamiento que a estos se les aplica en cada piscicultura. Además, esta investigación permitirá aportar antecedentes con base científico – tecnológica para una futura aplicación de lodos residuales acuícolas a suelos, asimismo de información para empresas, instituciones públicas y privadas para la toma de decisiones, en este rubro.

HIPOTESIS

Las propiedades físico – químicas y biológicas de los lodos residuales no son afectadas por el tipo de piscicultura, es decir, no existen diferencias para el tipo flujo abierto y de recirculación.

El proceso de digestión anaerobia en condición mesofílica es un método adecuado para reducir el contenido de sólidos volátiles (Materia orgánica) de los lodos residuales de piscicultura.

OBJETIVOS

1. Objetivo general

Estudiar los lodos residuales de dos tipos de pisciculturas (de flujo abierto y de recirculación) y evaluar un método de estabilización para su posterior aplicación en suelos.

2. Objetivo específico

- Caracterizar los lodos residuales generados en pisciculturas de tipo flujo abierto y de recirculación.
- Comparar los lodos residuales provenientes de dos tipos de pisciculturas en base a sus propiedades físico - químicas y biológicas.
- Evaluar la eficiencia de digestión anaerobia mesofílica sobre la disminución del contenido de sólidos volátiles, parásitos y patógenos en lodos residuales para pisciculturas de tipo flujo abierto y de recirculación.

Actualmente, en Chile no se dispone de una regulación específica para el manejo y la aplicación de lodos provenientes del cultivo del salmón en suelos que permita asegurar condiciones sanitarias y ambientalmente seguras para su aplicación (Mazzarino *et al.*, 1997). En esta materia es necesario conocer aquellos parámetros críticos como la presencia de antibióticos, metales, parásitos y patógenos, así como el contenido de Nitrógeno, Fósforo y materia orgánica presentes en los lodos residuales.

El Decreto Supremo N°4 del año 2009 (DS04/09) establece que el lodo debe ser tratado con el fin de estabilizar e higienizar antes de su aplicación a suelo. Esto incluye reducir el contenido de coliformes fecales, *salmonella sp.*, ovas de helminto y el contenido de materia orgánica (sólidos volátiles). Una de las alternativas de tratamiento más ampliamente usadas para este propósito corresponde a la digestión anaerobia.

ANTECEDENTES GENERALES

Actualmente en Chile existen 112 pisciculturas emplazadas entre la región Metropolitana y la región de Los Lagos, de las cuales el 77% son de tipo flujo abierto, 14% de recirculación, 8% ubicadas en lagos y 1% emplazadas en estuarios.

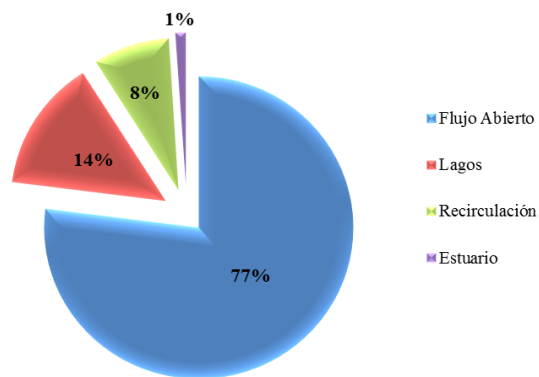


Figura N° 2: Tipos de pisciculturas en Chile.

En el año 2011, una encuesta al 40% de las pisciculturas nacionales, permitió conocer una media anual de lodos de 158m³ por piscicultura, lo cual llevó a un valor estimado de 17.000 m³ de lodos generados por toda la industria. De ellos, el 70% se generó entre la región de La Araucanía y la región de Los Lagos (Intesal, 2012).

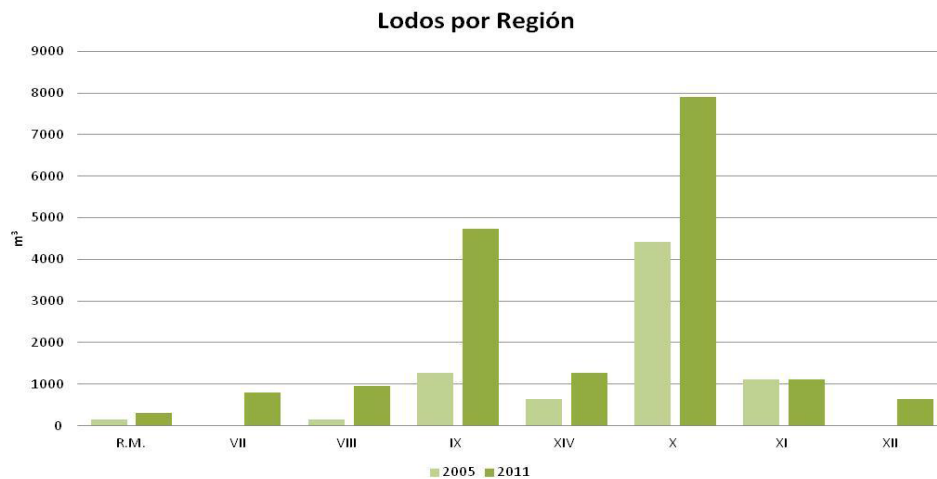


Figura N° 3: Total lodos generados por región en Chile (SalmonChile-Intesal, 2012).

1. Lodos residuales del cultivo del salmón

En cada una de las etapas de producción en agua dulce (fecundación, 1ª alimentación y alevinaje) los lodos consisten básicamente en alimento no consumido y fecas. Además que pueden contener microorganismos patógenos, parásitos y residuos químicos tales como inductores del desove, anestésicos, antimicrobianos y desinfectantes.



Figura N° 4: Origen de lodo residual en el cultivo del salmón.

Se estima que por cada tonelada de salmón producido se generan 1,4 toneladas de lodo residual, esto se debe principalmente a que no todo el alimento suministrado en el cultivo es consumido por los peces (Salazar *et al.*, 2005).



Figura N° 5: Relación de producción del lodo residual.

Estudios e investigaciones han demostrado que los lodos provenientes del cultivo del salmón poseen características como mejoradores de suelos y su aplicación serviría para recuperar suelos degradados (Teuber *et al.*, 2005).

La utilidad de los lodos para la agricultura radica en su alto contenido de Nitrógeno y Fósforo, sumado a que estos lodos pueden tener hasta 50% de materia orgánica (Celis *et al.*, 2006) y pueden mejorar las características físicas del suelo, como estructura y capacidad de retención de agua (Six *et al.*, 2000).

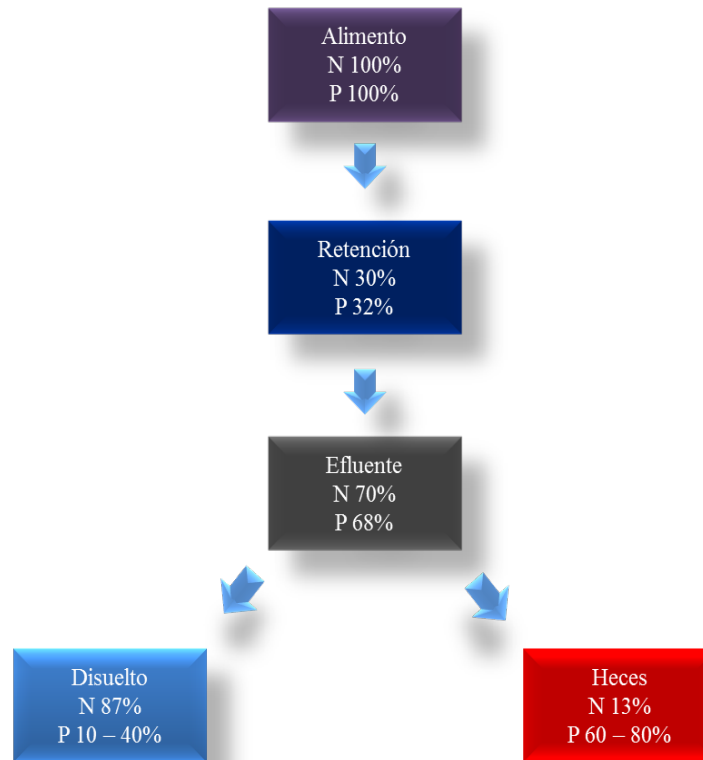


Figura N° 6: Flujograma de nutrientes en el pez (Buschmann, 2001).

Se conoce que cerca de un 25% de los nutrientes son asimilados por el pez, mientras que entre un 75% y 80% queda en el ambiente. Además se estima que más del 60% del Fósforo (P) y el 80% del Nitrógeno (N) aportado por los desechos de las especies cultivadas termina finalmente en el agua (Buschmann, 2001). También hay elementos químicos utilizados como pigmentos incorporados al alimento, desinfectantes y productos para el control de enfermedades como antibióticos, fungicidas y compuestos antiparasitarios que son depositados en estos lodos.

Los antibióticos son suministrados por vía oral o como vacunas inyectables, sin embargo la mayor parte de estos compuestos termina en el ambiente, a través del alimento no ingerido y en las fecas. Algunos antibióticos solubles se diluyen rápidamente, minimizando el riesgo de que queden depositados en los lodos.

2. Ciclo productivo de pisciculturas

El ciclo productivo del salmón consta de diferentes etapas que están asociadas al tamaño de los peces, a sus requerimientos ambientales y alimenticios. El proceso productivo considera el funcionamiento de una piscicultura para el cultivo de salmónidos de flujo abierto y de recirculación basada en áreas de cultivo fácilmente identificables para cada etapa del proceso. Estas áreas permitirán un control y manejo del proceso en forma ordenada y eficiente.

2.1 Fertilización

En otoño se produce el desove de los reproductores. Se cosechan las ovas de las hembras y el semen de los machos, de cuya mezcla resulta la ova fertilizada. El proceso se realiza a una temperatura aproximada de 7°C.

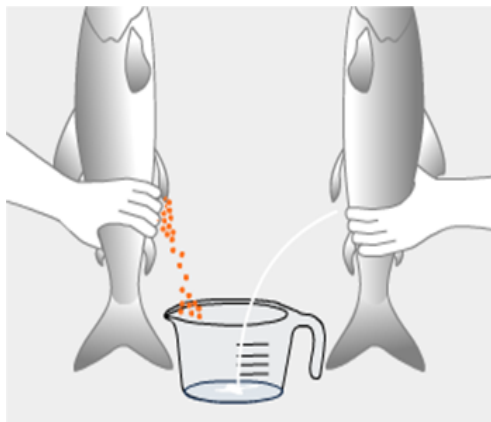


Figura N° 7: Fertilización de ovas con gametos masculinos.

En esta etapa los lodos están constituidos básicamente por:

- ✓ Desinfectantes
- ✓ Antimicrobianos

2.2 Incubación

La incubación de las ovas tiene lugar en agua dulce, donde éstas completan su desarrollo hasta la eclosión. La velocidad con que se desarrollan las ovas depende fundamentalmente de la temperatura del agua durante la incubación. Esta etapa es muy delicada y requiere de aguas claras y bien oxigenadas, con una temperatura máxima de 12°C en condiciones de penumbra o semi penumbra.

En este período, la manipulación de las ovas debe ser mínima, reduciéndose sólo a la extracción cuidadosa de ovas muertas que se distinguen fácilmente por su color blanquecino opaco. Tras cuatro semanas en incubadora, los huevos alcanzan el estado conocido como “ova ojo”, siendo lo suficientemente fuertes para tolerar su transporte.

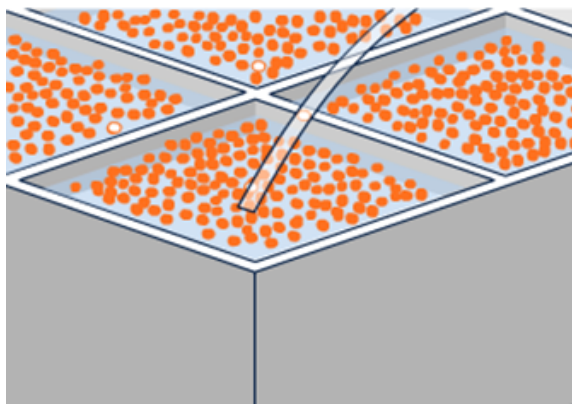


Figura N° 8: Incubación de ovas fertilizadas.

En esta etapa los lodos están constituidos básicamente por:

- ✓ Desinfectantes
- ✓ Antimicrobianos
- ✓ Mortalidad

2.3 Eclosión

Luego viene la eclosión, momento en que los pequeños alevines rompen el huevo y pueden comenzar a nadar juntos a sus sacos vitelinos. Esta primera etapa se desarrolla en incubadoras y termina aproximadamente un mes después, cuando se produce la completa absorción del saco.



Figura N° 9: Eclosión de ovas.

En esta etapa los lodos están constituidos básicamente por:

- ✓ Fecas
- ✓ Antimicrobianos
- ✓ Desinfectantes
- ✓ Mortalidad

2.4 Alevinaje

Cumplida esta fase, el alevín nada libremente e inicia su alimentación, ya sea en el mismo incubador, en bateas o mallas de primera alimentación, hasta convertirse en el denominado alevín parr, o salmón juvenil.

Es en esta etapa cuando los peces crecen más rápidamente, por lo que sus requerimientos nutricionales son mucho más altos.

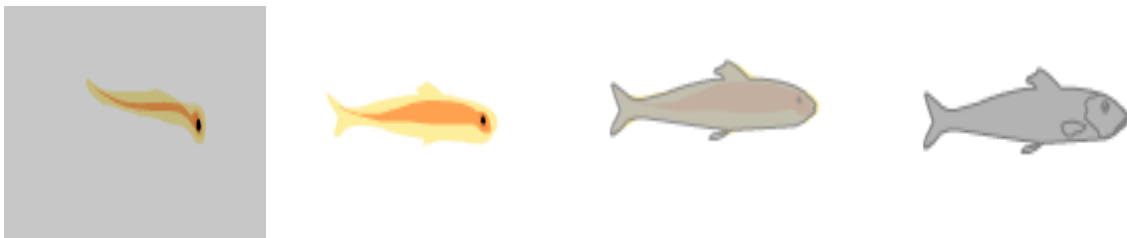


Figura N° 10: Cambios físicos y biológicos del salmón.

En esta etapa los lodos están constituidos básicamente por:

- ✓ Fecas
- ✓ Alimento
- ✓ Antimicrobianos
- ✓ Desinfectantes
- ✓ Mortalidad

3. Tipos de pisciculturas

3.1 Piscicultura de flujo abierto

Estas instalaciones en tierra utilizan el agua ya sea de cursos o cuerpos de agua adyacentes. Una vez que ésta ingresa a la piscicultura y pasa a través de estanques de cultivo es descargada nuevamente al río, estero o lago.

3.1.1 Tratamiento de lodos residuales en piscicultura de flujo abierto

La piscicultura de flujo abierto puede contar con una piscina de decantación donde son acumulados los riles (residuos industriales líquidos). A medida que pasa el tiempo, los lodos van apareciendo a medida que decanta todo el material particulado que está en la columna de agua. Para algunos efectos, algunas pisciculturas usan métodos para la aceleración de esta decantación, así como también un tratamiento para degradar la materia orgánica.



Figura N° 11: Área para el manejo y tratamiento de lodos residuales en piscicultura de flujo abierto.

A continuación se muestra un diagrama de flujo de una piscicultura común de flujo abierto o continuo:

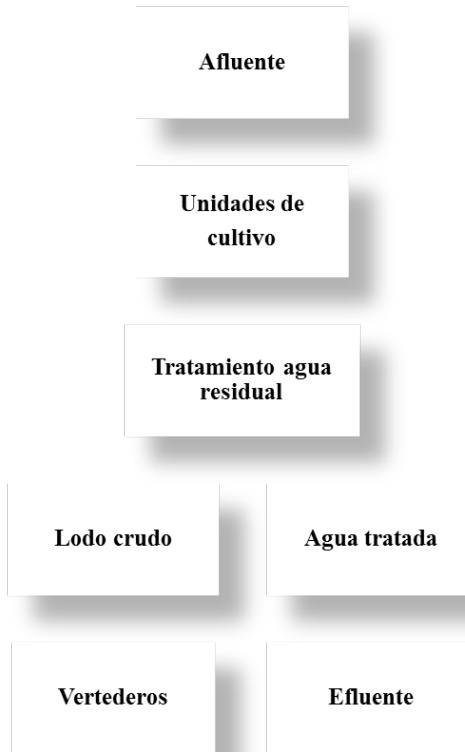


Figura N° 12: Diagrama de flujo en piscicultura de flujo abierto.

3.2 Piscicultura de recirculación

Un sistema de recirculación en acuicultura es un sistema que incorpora el tratamiento y la reutilización de agua para el cultivo de organismos, considerando alrededor del 10% de reemplazo de agua diariamente, pudiendo variar entre el 5 al 20% dependiendo del estanque de cultivo y filtración (Gooley y Gavine, 2003). El tratamiento del agua apunta a disminuir los altos niveles de alimento requerido que son utilizados para obtener altas tasas de crecimiento y altas densidades de stocks de ejemplares económicamente rentables.

Un sistema de recirculación consiste principalmente de componentes de filtración mecánica y biológica, bombas y estanques contenedores, pudiendo incluir un número adicional de elementos de tratamiento de agua que mejoran la calidad de la misma y el control de enfermedades dentro del sistema.

La descripción y diseño del sistema consiste en la captación de las aguas efluentes de cada estanque de cultivo, y su conducción a través de una secuencia de procesos que la devolverán finalmente a los estanques, en calidad tal que los peces puedan seguir creciendo en las mejores condiciones.

3.2.1 Tratamiento de lodos residuales en piscicultura de recirculación

En la piscicultura de recirculación existen varios métodos para la acumulación y almacenamiento de riles, donde por medio de conos de decantación, filtros rotatorios y filtros de banda, los lodos son almacenados y estabilizados para que puedan ser retirados y llevados a vertederos y cumplir con las normativas que exige la autoridad sanitaria.



Figura N° 13: Área para el manejo y tratamiento de lodos residuales en piscicultura de recirculación.

A continuación se muestra un diagrama de flujo de una piscicultura común de recirculación:

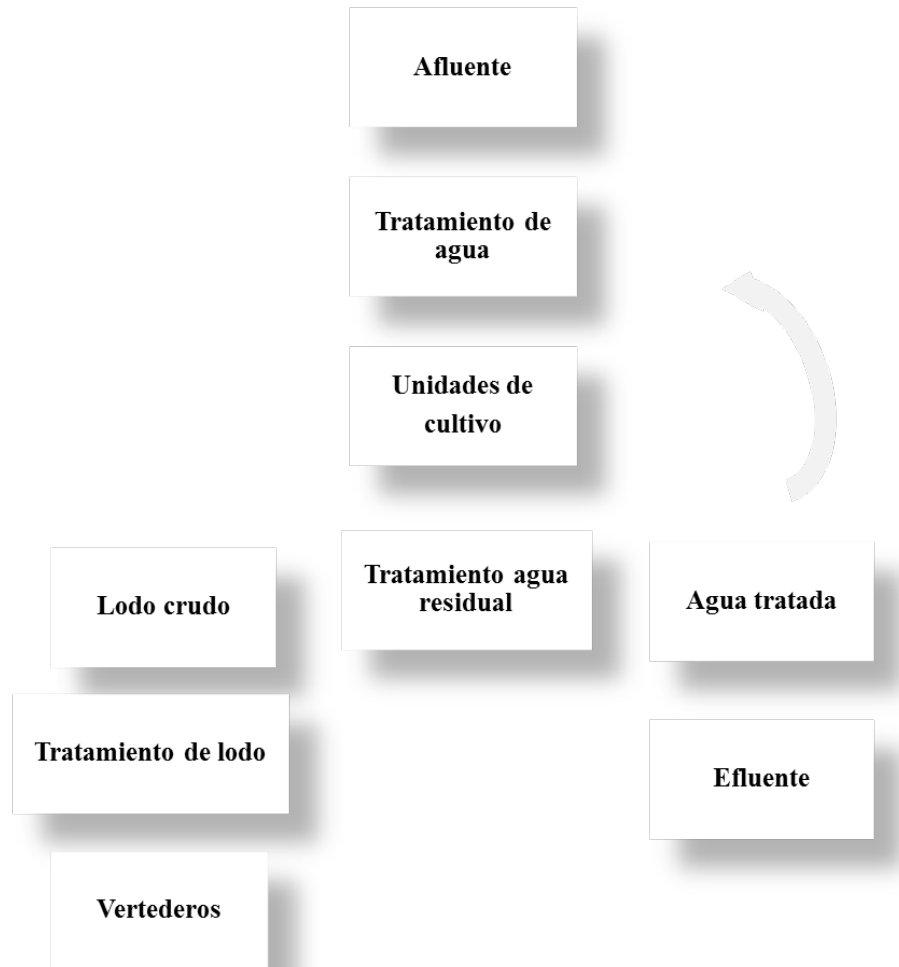


Figura N° 14: Diagrama flujo en piscicultura de recirculación.

4. Normativa ambiental relevante para la industria salmonera

Tabla N° 1: Normativa ambiental relevante para industria del salmón.

Norma	Año	Repartición	Materia
DFL 725	1967	MINSAL	Código Sanitario. (<i>Artículos 78 a 81: De los desperdicios y basuras</i>)
DFL 1	1989	MINSAL	Determina materias que requieren autorización sanitaria expresa. (<i>N° 22, 25, 26, 40 y 44: Instalaciones, obras y lugares destinados a la acumulación, tratamiento y disposición final de residuos</i>)
DS 4.740	1947	Interior	Normas sanitarias mínimas municipales.
DS 144	1961	MINSAL	Establece normas para evitar emanaciones o contaminantes atmosféricos de cualquier naturaleza. (<i>Artículo 6: Prohíbe dentro del radio urbano de las ciudades, la incineración libre de hojas secas, basuras, u otros desperdicios.</i>)
DS 685	1992	RR.EE.	Convenio de Basilea, que establece el control de los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos.
DS 594	2000	MINSAL	Establece condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo. (<i>Artículos 16 a 20: De la disposición de residuos industriales líquidos y sólidos</i>) Modificado por DS 201/2001.
Res. 7.077	1976	MINSAL	Prohíbe incineración como método de eliminación de residuos sólidos de origen doméstico e industrial en determinadas comunas de la Región Metropolitana.
Res. 7.539	1976	MINSAL	Normas mínimas para operación de basurales en Santiago.
Res. 3.276	1977	MINSAL	Transporte de desechos orgánicos provenientes de lugares de fabricación y/o elaboración. De alimentos, susceptibles a ser empleados en la crianza y engorda de animales.
Res. 5.081	1993	Sesma	Establece sistema de declaración y seguimiento de desechos sólidos industriales, en la Región Metropolitana.

5. Métodos de estabilización para lodos residuales

Los propósitos principales de la estabilización de lodos son: romper bioquímicamente los sólidos orgánicos para que sean más estables (Menos pestíferos y menos putrescibles) y más deshidratables para reducir la masa del lodo. Si se ha decidido deshidratar y quemar no se aplica la estabilización.

Actualmente los métodos para la estabilización de lodos son las siguientes:

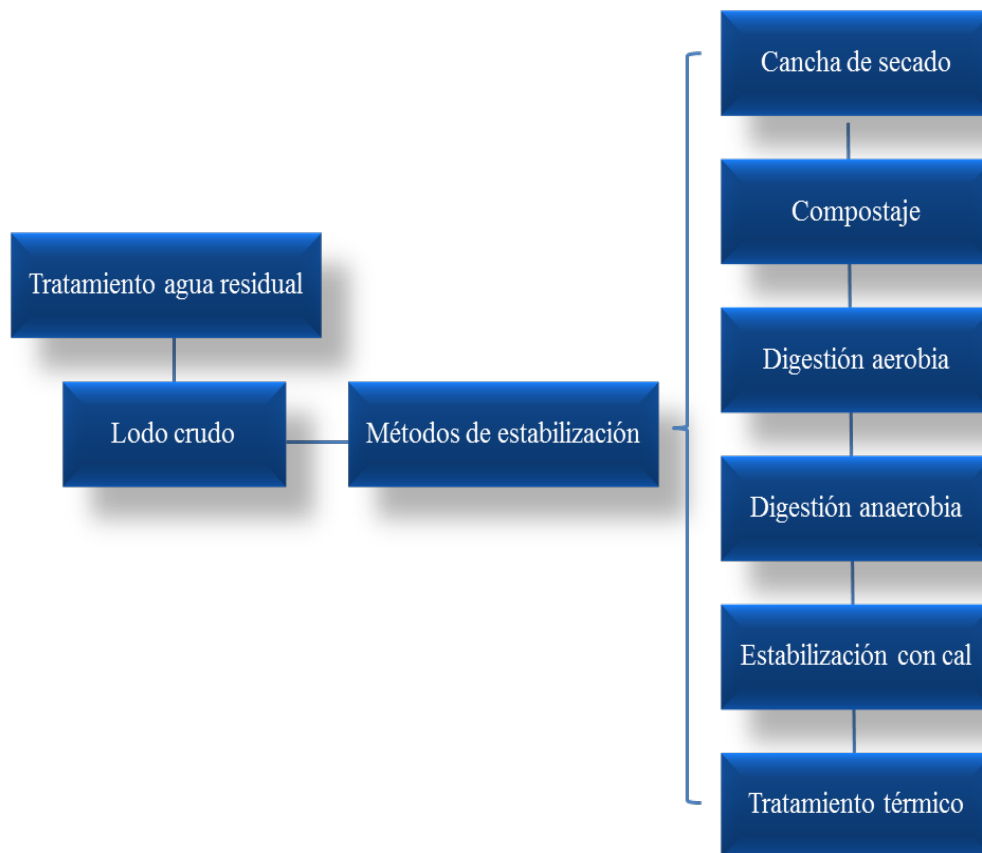


Figura N° 15: Métodos de estabilización para lodos residuales (Metcalf y Eddy Inc, 2003).

6. Manejo y tratamiento de lodos residuales en pisciculturas

De acuerdo al DS594/99 (Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo), las pisciculturas que generan lodos residuales deben cumplir con normas sanitarias, antes de que sus lodos puedan ser retirados del predio de la empresa.

Por otra parte, la acumulación, tratamiento y disposición final de residuos industriales dentro o fuera del predio industrial, local o lugar de trabajo deberá contar con la autorización sanitaria (Art N°18, 19, 20). La mayoría de las pisciculturas tratan sus lodos con cal permitiendo su estabilización.

7. Aplicación de lodos residuales en suelos

Para que un lodo pueda ser aplicado al suelo debe cumplir con cierto requisito, de acuerdo al Decreto Supremo N°4/2009, Reglamento para el Manejo de Lodos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas, de la Subsecretaría General de la Presidencia, que regula el manejo de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas, establece la clasificación sanitaria de los lodos y las exigencias sanitarias mínimas para su manejo, además de las restricciones, requisitos y condiciones técnicas para la aplicación de lodos en determinados suelos.

El reglamento considera dos alternativas de destino final de estos lodos:

Disposición final: Procedimiento de eliminación mediante el depósito definitivo de lodos, con tratamiento previo, en rellenos sanitarios o en mono-rellenos.

Aplicación de lodos al suelo: Procedimiento de eliminación mediante la incorporación de lodos al suelo, o mezcla del lodo con suelo, mediante el uso de equipos adecuados.

Según lo anterior se considerará lodo **Clase A:**

Tener una densidad de coliformes fecales menor a 1.000 Número Más Probable (NMP) por gramo de sólidos totales en base materia seca, o tener una densidad de *salmonella sp.* menor a 3 NMP en 4 gramos de sólidos totales en base materia seca.

Tener un contenido de ovas de helminto viable menor a 1 en 4 gramos de sólidos totales en base materia seca, cuyo cumplimiento se podrá demostrar mediante la aprobación por la Autoridad Sanitaria de las condiciones de operación de uno de los procesos de higienización señalados a continuación

Además, se considerarán lodos **Clase B** aquellos que cumplan con los siguientes requisitos adicionalmente al cumplimiento de la reducción de la atracción de vectores: la media geométrica del contenido de coliformes fecales, producto del análisis de un número de muestras no inferior a siete, tomadas al momento de su uso o de su eliminación, debe ser menor que 2.000 NMP por gramo de sólidos totales, en base materia seca.

Se considerarán como lodos estabilizados o con reducción del potencial de atracción de vectores sanitarios, a los lodos a los que se les ha reducido los sólidos volátiles en un 38% como mínimo.

Si los lodos son tratados por digestión anaeróbica y la reducción de sólidos volátiles es inferior al 38%, es posible demostrar la reducción de atracción de vectores mediante una prueba de digestión adicional de lodos a escala de laboratorio.

La reducción de atracción de vectores queda demostrada si después de la digestión anaeróbica de los lodos por un período adicional de 40 días a una temperatura de entre 30 y 37°C, los sólidos volátiles son reducidos en un porcentaje inferior al 17% del valor al inicio de este período.

En esta investigación se utilizará como referencia dicho Decreto Supremo (DS04/09) para clasificar el lodo según su grado de estabilización e higienización, además de la guía de aplicación de lodos de piscicultura en suelos (Ecoing LTDA. 2009).

Un lodo estabilizado es aquel que tiene una reducción del potencial de atracción de vectores sanitarios, como también la eliminación de malos olores y un lodo higienizado es aquel que está libre de patógenos y parásitos.

Por lo tanto, la estabilización e higienización es un proceso de tratamiento del lodo residual, obteniendo un producto con características adecuadas para ser dispuesto en suelos sin generar daño al medio ambiente ni crear condiciones de enfermedad hacia la salud humana y animal.

Los lodos pueden ser reutilizados y/o valorizados y como alternativa de disposición final es la aplicación al suelo por el alto contenido en Fósforo, Nitrógeno y materia orgánica que tienen estos.

En ausencia de una normativa que regule la aplicación en suelos de lodos provenientes de pisciculturas en Chile, hace necesario buscar una alternativa que se ajuste a los requerimientos sanitarios y ambientales sustentables para la aplicación en suelos de estos lodos residuales de pisciculturas.

8. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso ampliamente usado que permite la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular, que permite la formación de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y gases traza.

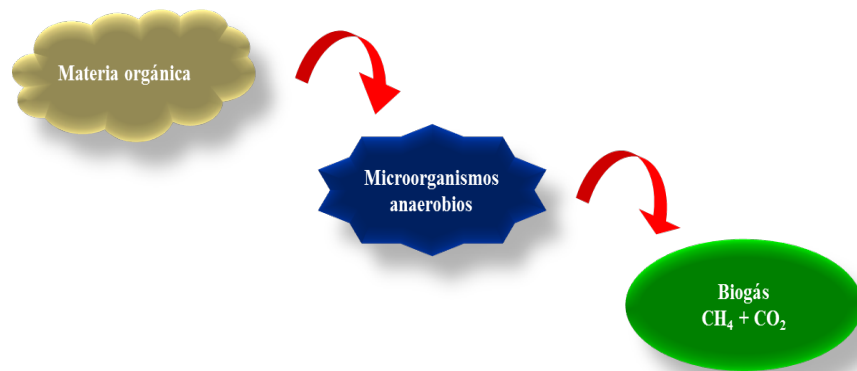


Figura N° 16: Degradación biológica de la materia orgánica.

8.1 Degradación anaerobia de la materia orgánica

La degradación anaerobia de la materia orgánica requiere la intervención de diversos grupos de bacterias facultativas y anaerobias obligadas, las cuales utilizan en forma secuencial los productos metabólicos generados por cada grupo.

La digestión anaerobia de la materia orgánica involucra tres grandes grupos tróficos y cuatro pasos de transformación:

HIDRÓLISIS

Grupo I: bacterias hidrolíticas

ACIDOGÉNESIS

Grupo I: bacterias fermentativas

ACETOGÉNESIS

Grupo II: bacterias acetogénicas

METANOGÉNESIS

Grupo III: bacterias metanogénicas

El proceso se inicia con la hidrólisis de polisacáridos, proteínas y lípidos por la acción de enzimas extracelulares producidas por las bacterias del Grupo I. Los productos de esta reacción son moléculas de bajo peso molecular como los azúcares, los aminoácidos, los ácidos grasos y los alcoholes, los cuales son transportados a través de la membrana celular; posteriormente son fermentados a ácidos grasos con bajo número de carbonos como los ácidos acético, fórmico, propiónico y butírico, así como también compuestos reducidos como el etanol, además de H₂ y CO₂. Los productos de fermentación son convertidos a acetato, hidrógeno y dióxido de carbono por la acción de las bacterias del Grupo II, las cuales son conocidas como “bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno”. Finalmente las bacterias del Grupo III o metanogénicas convierten el acetato a metano y CO₂, o reducen el CO₂ a metano.

Estas transformaciones involucran dos grupos metanogénicos que son los encargados de llevar a cabo las transformaciones mencionadas anteriormente: acetotróficas e hidrogenotróficas. En menor proporción, compuestos como el metanol, las metilaminas y el ácido fórmico pueden también ser usados como sustratos del grupo metanogénico (Díaz-Báez, 2002).

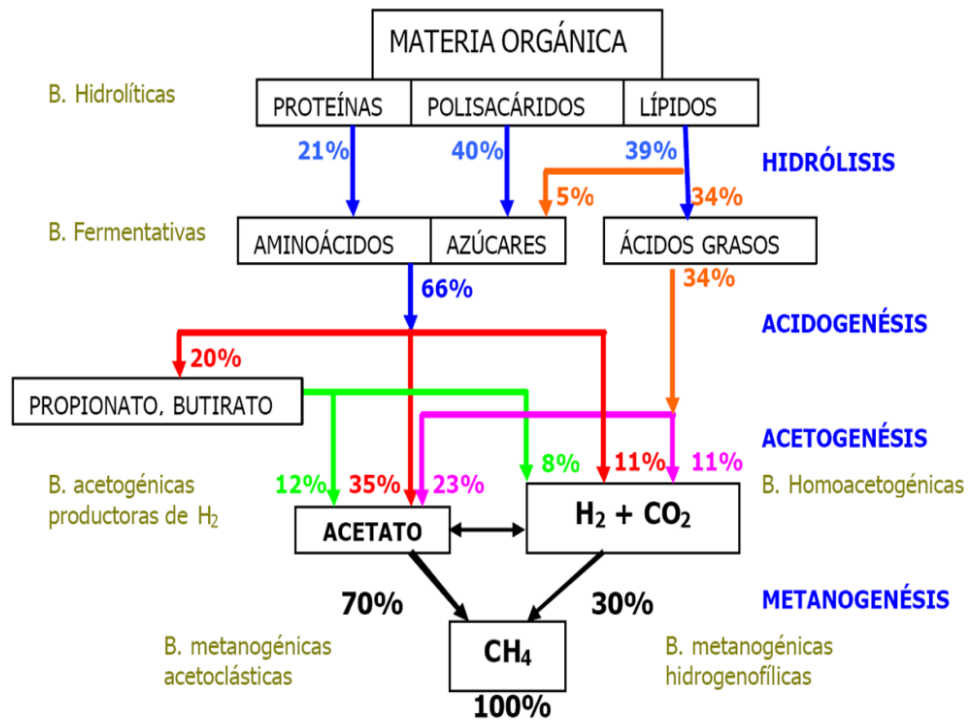


Figura N° 17: Etapas de la digestión anaerobia (Romero, 2002).

El lodo una vez estabilizado tiene un bajo contenido de materia orgánica, microorganismos patógenos y es poco susceptible a descomposición (Márquez, 2005). En el proceso de digestión anaeróbica, la materia orgánica contenida en los lodos se transforma biológicamente, bajo condiciones anaerobias. Mediante este tratamiento es posible lograr porcentajes de remoción de 50 - 60% de la demanda bioquímica de oxígeno y 50 - 65% de los sólidos volátiles (Márquez, 2005). El proceso de digestión anaerobia se lleva a cabo en un reactor completamente cerrado, los lodos se introducen en el reactor continuo, intermitente o discontinuo y son retenidos en el mismo durante periodos de tiempos variables.

El lodo estabilizado, que se extrae continua o intermitentemente del proceso, no es putrescible y su contenido patógeno es bajo (Rodríguez, 2010).

8.2 Parámetros del proceso de la digestión anaerobia

Para que el proceso de digestión anaerobia del lodo residual sea llevado de forma adecuada, los microorganismos formadores de ácidos y de metano se deben encontrar en un estado de equilibrio dinámico. En este estado influyen una serie de factores físicos y químicos que alteran el equilibrio dentro del reactor, desplazándolo hacia altos o bajos rendimientos en cuanto a la producción y calidad del biogás generado y la calidad del efluente. Seguidamente, se realiza una descripción de los factores físicos y químicos que afectan el rendimiento global de los reactores anaeróbicos.

8.2.1 Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros ambientales que afectan de manera importante el crecimiento de las bacterias. En el tratamiento anaerobio, los reactores se suelen mantener a temperatura entre los 25 - 40°C, conocido como rango mesofílico, y mayores de 45°C, conocido como rango termofílico. La estabilidad de este parámetro es importante, ya que cambios de temperatura pueden producir caídas en la eficiencia del proceso hasta lograr de nuevo la aclimatación (Campos, 2001).

El aumento de la temperatura trae consigo las siguientes ventajas (Márquez, 2005):

- La tasa de digestión es más rápida, más corta y por lo tanto se requieren tiempos de retención menores.
- Reactores de menor volumen son necesarios para el tratamiento de la misma cantidad de residuos.
- Mayor velocidad y eficiencia de la hidrólisis de la materia particulada.
- Destrucción más eficiente de los agentes patógenos.

8.2.2 Agitación

La agitación de los reactores anaerobios tiene diversos objetivos (Noone, 1990):

- Poner en contacto el sustrato influente con la población bacteriana.
- Eliminar los metabolitos producidos por los metanogénicos, al favorecer la salida de los gases.
- Proporcionar una densidad uniforme de población bacteriana.
- Prevenir la formación de capa superficial y de espumas, así como la sedimentación en el reactor.
- La velocidad de agitación es un parámetro que puede influir en el desarrollo del proceso, siendo necesario un equilibrio entre la buena homogeneización y la correcta formación de agregados bacterianos (Fannin, 1987).

8.2.3 Potencial de Hidrógeno (pH)

En la digestión anaeróbica, el pH se limita a un intervalo relativamente estrecho, de aproximadamente 6.0 a 8.5 (Lay, Li, & Noike, 1997). Su variación puede provocar cambios de estado de los grupos ionizables de las enzimas como grupos carboxilo y amino, alteración de los componentes no ionizables del sistema y desnaturalización de la estructura proteica de las enzimas (Clark & Speece, 1989).

El pH, como variable de control, no se considera efectiva debido a su lentitud (Campos, 2001). Se consideran otras variables como mejores indicadores del estado del proceso anaerobio, como la producción de biogás y su contenido de metano (Hill & Holmberg, 1988), el contenido de ácidos grasos volátiles o la relación entre ellos (Hill, Cobb, & Bolte, 1987).

El hidróxido de calcio o cal es el material más utilizado para el control del pH en reactores anaerobios, debido a que es de bajo costo y fácil de obtener. A nivel práctico, la cal se añade cuando el pH se encuentra entre 6.4 a 6.5, en cantidades suficientes para elevar el pH hasta 6.8 (Coto, 1980).

8.3 Limitaciones asociadas con la digestión anaerobia

8.3.1 Arranque de los reactores anaerobios

Una característica particular de los microorganismos anaerobios es su baja tasa de crecimiento; por lo tanto, al iniciar el proceso de arranque del reactor se requiere de un periodo de tiempo que dependerá de la calidad y cantidad de inóculo utilizado. Sin embargo, en los casos en que no se cuenta con inóculos adecuados, esta etapa se puede prolongar incluso hasta condiciones críticas en las que nunca alcanza la estabilidad. Por ello, el arranque de reactores anaerobios requiere contar con herramientas apropiadas para la obtención y evaluación de los inóculos más eficientes.

8.3.2 Postratamientos

La digestión anaerobia es un proceso eficiente para la remoción de materia orgánica, pero tiene poco efecto sobre la concentración de nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) y parcialmente sobre la remoción de patógenos. Dependiendo de la disposición final del efluente y de la legislación local sobre la calidad mínima de vertimientos, puede existir la necesidad de postratamientos para remover la concentración residual de la materia orgánica y de sólidos suspendidos, y para reducir la concentración de nutrientes y patógenos. Los recursos tecnológicos más utilizados incluyen procesos biológicos como Lodos Activados, Filtros Percoladores, Lagunas de Oxidación,

Humedales y Plantas Acuáticas; también pueden ser utilizados procesos físicos, químicos o fisicoquímicos como Filtración en Arena, Desinfección y Floculación- Coagulación (van Haandel, 1994).

8.3.3 Otros factores

Según Montes (2008), otros factores que pueden inhibir el proceso de digestión anaerobia son el pH, la temperatura y el tiempo de retención de la materia orgánica en el reactor.

pH: Cada microorganismo posee un rango de pH óptimo diferente. Las bacterias productoras de metano son extremadamente sensibles al pH, con un rango óptimo entre 6,8 - 7,2; los rangos de pH óptimo para los demás grupos tróficos de microorganismos son de 7,2 - 7,4 para las bacterias hidrolíticas; 6,6 para las especies acetogénicas y 5 - 6 para las acidogénicas.

Temperatura: Es importante mantener una temperatura de operación estable en el digestor, dado que fluctuaciones fuertes y/o frecuentes en la temperatura afectaría a las bacterias, especialmente las Metanogénicas, produciendo desequilibrios ecológicos en el proceso, y este efecto se traducirá en una baja de producción y en algunos casos, en la paralización del proceso.

Tiempos de Retención: El factor más importante en el dimensionamiento de un digestor anaerobio es que las bacterias tengan un tiempo suficiente para reproducirse y metabolizar los sólidos volátiles (SV). Los parámetros clave en este sentido son el tiempo de retención de sólidos (TRS), que es el tiempo promedio en que las bacterias están en el digestor, y el tiempo de retención hidráulico (TRH), que es el tiempo promedio en que el lodo líquido se mantiene en el digestor.

MATERIALES Y METODOS

1. Área de estudio

En este trabajo de investigación se estudiará el lodo proveniente de dos tipos de piscicultura: una de flujo abierto o continuo y otra de recirculación, ambas pisciculturas pertenecen a la Empresa Marine Harvest S.A, estableciendo sitio A para piscicultura de flujo abierto y sitio B para piscicultura de recirculación, ambas ubicadas dentro de la región de Los Lagos (Figura N°18). Cada piscicultura cuenta con métodos distintos de manejo y tratamiento de lodos residuales, es por esta razón la cual se eligió, ya que son los dos tipos más comunes de pisciculturas en Chile (Figura N°2), con el fin de conocer si existen diferencias en base a sus propiedades físico-químicas y biológicas.

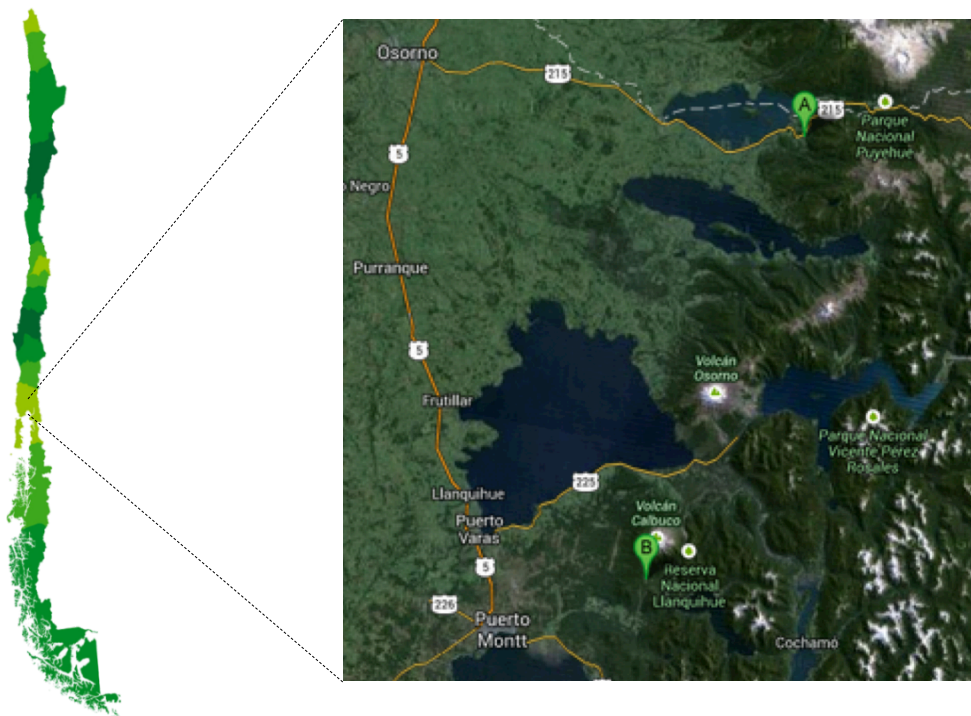


Figura N° 18: Ubicación de pisciculturas en estudio.

2. Extracción de lodos residuales

La extracción del lodo es distinta en ambas pisciculturas, ya que cuentan con distintos métodos de tratar y almacenar los lodos generados en cada una de sus salas de producción.

En este trabajo de investigación se generó un protocolo de extracción para los lodos residuales de pisciculturas (Anexo N°1).

Las muestras de lodos fueron enviadas a laboratorios acreditados con el fin de caracterizar estos lodos en base a los siguientes conceptos:

- **Concentración de metales**

- Arsénico total
- Cadmio total
- Mercurio total
- Plomo total
- Selenio total
- Zinc total

- **Concentración de Nutrientes**

- Fósforo total
- Nitrógeno total
- Materia orgánica

- **Presencia de Patógenos**

- *salmonella sp.*
- Coliformes fecales

- **Presencia de Parásitos**

- *Áscaris*
- *Diphyllobothrium*
- *Dipylidium*
- *Hymenolepis*
- Ovas de helminto
- *Taenia*
- *Toxocara*
- *Trichiuris*
- *Trichosomoides*

- **Propiedades físicas**

- Humedad
- Sólidos totales

Los lodos residuales generados en piscicultura de flujo abierto fueron extraídos desde el fondo de la piscina de sedimentación de forma manual (Figura N°19).



Figura N° 19: Estanque de decantación en piscicultura de flujo abierto

En piscicultura de recirculación los lodos residuales son extraídos desde los conos de sedimentación (Figura N°20).



Figura N° 20: Conos de sedimentación en piscicultura de recirculación

En ambos sitios se tomaron muestras en triplicado de lodo residual, con una frecuencia de muestreo cada dos meses, entre Marzo y Octubre del año 2013, con el fin de caracterizar la variabilidad de los componentes durante el tiempo en estudio.

3. Proceso de la digestión anaerobia

Las muestras de lodos residuales obtenidas en los meses de Marzo y Septiembre fueron sometidas a tratamiento, donde se evaluó el tratamiento de digestión anaerobia en digestores de acero inoxidable bajo condición mesofílica (35–40°C). Las muestras de lodos residuales del mes de Marzo fueron tratadas sin la presencia de inóculo por un periodo de 120 días, en tanto que las muestras del mes de Septiembre fueron sometidas al proceso de digestión con presencia de inóculo formado por estiércol de vaca diluido y un producto comercial (consorcio de bacterias) durante 56 días, con lo que se pretende evaluar el comportamiento que tendría la digestión sobre los lodos de dicho mes.



Figura N° 21: Laboratorio de lodos acuícolas, UACH Puerto Montt

Las muestras de lodos residuales de las dos pisciculturas (de flujo abierto y de recirculación) fueron sometidas a proceso de digestión anaeróbica a escala piloto, en digestores de 80 litros de capacidad, en sistemas batch (triplicado) en condiciones mesofílicas (35–40°C), ubicado en dependencias de la Universidad Austral de Chile (Figura N°21).

A continuación se muestran los digestores de acero inoxidable utilizados en el estudio:



Figura N° 22: Digestores para el proceso anaerobio.

Cada digester anaerobio posee una estructura de agitación con el fin de homogenizar el lodo mientras está sometido al tratamiento. Es necesario este manejo ya que las bacterias que están involucradas en la digestión deben estar siempre en contacto con el sustrato sin digerir. A continuación se muestra la estructura agitadora que posee cada digester utilizado en el estudio:



Figura N° 23: Estructura de agitación para digestores anaerobios.



Figura N° 24: Sistema de digestión anaerobia, UCh Puerto Montt.

Durante el periodo estimado para cada proceso, se contempló el control de variables como pH, temperatura (interna de lodo) y sólidos volátiles. Los parámetros de control con sus límites superior e inferior fueron monitoreados constantemente. El sistema de digestión anaerobia consta de un bins de polietileno que posee un sistema de recirculación de agua con el fin de tener homogenizada la temperatura del baño térmico. Para elevar la temperatura del baño térmico se instalaron dos resistencias que están sumergidas en agua con el fin de intercambiar calor, controlado con un sensor de temperatura donde se puede ajustar la temperatura del baño térmico.



Figura N° 25: Estructura de digestión anaerobio.

4. Análisis de datos

Se planteó caracterizar las propiedades del lodo generado en ambas pisciculturas para identificar si alguno de sus componentes esta en mayor o menor concentración en algunas de las pisciculturas. Este análisis se realizó para evaluar si las propiedades del lodo cambian a lo largo de la fase de producción.

Además se comparó estadísticamente los componentes analizados por los laboratorios a través de un test No paramétrico Mann-Whitney para encontrar diferencias entre pisciculturas. Además se analizó la variabilidad de los componentes por cada piscicultura para determinar cómo es la tendencia dentro del periodo de estudio con un test de Kruskal-Wallis. El software utilizado es Statistica v7.0, donde se realizaron todos los análisis estadísticos.

Para evaluar la digestión anaerobia se compararon los lodos residuales crudos con lodos residuales digeridos para cada escenario con la finalidad de conocer que si el tipo de piscicultura afecta a la digestión anaeróbica.

La calificación del lodo (según grado de estabilización e higienización, tipo y concentración de metales, tipo y concentración de antibióticos, etc.) se realizó usando como referencia Decreto Supremo N°4 del año 2009.

RESULTADOS

1. Caracterización del lodo residual crudo

El lodo residual de piscicultura proviene del cultivo del salmón del atlántico en agua dulce desde la etapa de desove hasta la etapa de alevinaje. En piscicultura de flujo abierto este lodo residual corresponde a una fracción húmeda (77,3 a 87,9%) obtenida desde estanques de decantación. En tanto que el lodo residual de la piscicultura de recirculación se obtuvo desde los conos de decantación, con una humedad entre 80,8 y 90,8%. Los sólidos totales fluctúan entre un rango del 12,1 a 22,7% para flujo abierto y entre un 9,2 a 19,2% en piscicultura de recirculación (Tablas N°4 y N°8). Ambas pisciculturas presentan un valor de pH cercano a 6,0.

Este tipo de residuo está constituido principalmente por fecas, alimento no consumido y algunos otros componentes como inductores del desove, anestésicos, entre otros. La caracterización de las propiedades de las muestras del lodo residual obtenidas entre los meses de Marzo a Octubre del año 2013, indican que en este residuo existe la presencia de *salmonella sp.*, coliformes fecales y ovas de helminto (Tablas N°5 y N°9). Observándose para este último en todo el periodo de estudio una concentración menor a 1 NMP/4g de sólidos totales.

En ninguna de las muestras analizadas fue detectada la presencia de los antibióticos analizados: ácido oxolínico, florfenicol, ciprofloxacino, oxitetraciclina, flumequina, enrofloxacino.

Los resultados obtenidos de los análisis realizados en el lodo residual crudo para ambas pisciculturas (de flujo abierto y de recirculación) en todo el periodo del presente estudio arrojó que los componentes que se nombran a continuación presentaron valores <1,0 expresados en

NMP/4g de sólidos totales *Áscaris* total, *Diphyllobothrium* total, *Dipylidium* total, *Hymenolepis* total, *Taenia* total, *Toxocara* total, *Trichiuris* total, *Trichosomoides* total.

El análisis de metales presentes en el lodo residual para ambas pisciculturas en estudio, revela la presencia de Arsénico, Cadmio, Mercurio, Plomo, Selenio, Zinc (Tablas N°2 y N°6), observándose en ambos tipos de pisciculturas una mayor concentración de Zinc.

La concentración de Mercurio (Hg) en todo el periodo de estudio presenta una concentración menor a 1 mg/kg base seca, por lo que en el análisis estadístico no se incluirá. El análisis de los componentes del alimento suministrado a los peces en el periodo señala que Zinc y Mercurio corresponden a los metales que se encuentran en mayor y menor concentración respectivamente, en ambos tipos de pisciculturas (Anexo N°6: Figuras N°53 y N°55).

El contenido de los componentes orgánicos en el lodo residual crudo se analizó y caracterizó la concentración de Fósforo total, Nitrógeno total y Materia orgánica (Tablas N°3 a N°8). Se observa en ambos tipos de lodos residuales que la concentración de Nitrógeno total siempre es mayor que la concentración de Fósforo total. Lo que es consistente con lo observado en el tipo de alimento suministrado a los peces en el periodo de estudio para ambas pisciculturas (Anexo N°6: Figuras N°54 y N°56). En muestras del lodo residual en piscicultura de flujo abierto las concentraciones de Nitrógeno total y Fósforo total, presentan un rango que fluctúa entre 26,7 a 96,4 g/kg y un 29,4 a 47,3 g/kg base seca respectivamente. La concentración de Nitrógeno total fluctúa en un rango de 27,8 a 89,1 g/kg base seca y para el Fósforo total se observa un rango entre 31,4 a 64,8 g/kg base seca en muestras del lodo residual en piscicultura de recirculación.

Los resultados de las propiedades físico – químicas y biológicas (caracterización) del lodo residual crudo en ambos tipos de pisciculturas, son mostradas desde las tablas N°2 a N°9.

1.1 Caracterización lodo residual crudo de piscicultura de flujo abierto

1.1.1 Metales presentes en el lodo residual crudo

Tabla N° 2: Concentración promedio (n=3) de metales (mg/kg base seca) en el lodo residual crudo de piscicultura de flujo abierto.

Componente	Muestreo				
	Marzo	Mayo	Julio	Septiembre	Octubre
Arsénico total	1,9	2,5	2,0	2,6	6,0
Cadmio total	1,7	2,5	1,9	2,4	3,6
Mercurio total	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Plomo total	1,3	1,4	1,3	2,4	3,0
Selenio total	4,3	4,5	3,1	2,7	3,3
Zinc total	770,1	776,4	729,0	929,1	1205,5

1.1.2 Componentes orgánicos presentes en el lodo residual crudo

Tabla N° 3: Contenido promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) (g/kg base seca) en el lodo residual crudo de piscicultura de flujo abierto.

Componente	Muestreo				
	Marzo	Mayo	Julio	Septiembre	Octubre
P total	32,1	32,1	40,1	36,1	45,4
N total	94,4	52,3	51,2	50,9	68,0

Tabla N° 4: Contenido promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad expresados en porcentaje (%) en el lodo residual crudo de piscicultura de flujo abierto.

Componente	Muestreo				
	Marzo	Mayo	Julio	Septiembre	Octubre
Materia orgánica	69,6	68,9	70,4	58,0	56,6
Sólidos totales	21,7	20,1	17,2	14,4	12,2
Humedad	78,3	79,9	82,8	85,6	87,8

1.1.3 Patógenos presentes en el lodo residual crudo

Tabla N° 5: Concentración promedio (n=3) de patógenos presentes en el lodo residual crudo de piscicultura de flujo abierto.

Componente	Muestreo				
	Marzo	Mayo	Julio	Septiembre	Octubre
<i>salmonella sp.</i> NMP/g de sólidos totales	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
Coliformes fecales NMP/4g de sólidos totales	13,3	19,3	229,7	42,7	51,3

1.2 Caracterización lodo residual crudo de piscicultura de recirculación

1.2.1 Metales presentes en el lodo residual crudo

Tabla N° 6: Concentración promedio (n=3) de metales (mg/kg base seca) en el lodo residual crudo de piscicultura de recirculación.

Componente	Muestreo				
	Marzo	Mayo	Julio	Septiembre	Octubre
Arsénico total	2,5	3,7	2,7	1,7	2,6
Cadmio total	3,3	4,6	3,1	2,4	4,8
Mercurio total	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Plomo total	4,6	9,7	5,9	3,8	8,0
Selenio total	4,3	4,6	4,0	4,1	5,8
Zinc total	1015,4	1207,3	992,6	971,3	1235,9

1.2.2 Componentes orgánicos presentes en el lodo residual crudo

Tabla N° 7: Contenido promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) (g/kg base seca) en el lodo residual crudo de piscicultura de recirculación.

Componente	Muestreo				
	Marzo	Mayo	Julio	Septiembre	Octubre
P total	55,1	56,8	60,6	39,0	51,9
N total	79,5	79,0	64,4	62,4	86,8

Tabla N° 8: Contenido promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad expresados en porcentaje (%) en el lodo residual crudo de piscicultura de recirculación.

Componente	Muestreo				
	Marzo	Mayo	Julio	Septiembre	Octubre
Materia orgánica	60,0	59,9	57,3	68,7	64,0
Sólidos totales	19,1	10,7	14,1	14,6	9,4
Humedad	80,9	89,3	85,9	85,4	90,6

1.2.3 Patógenos presentes en el lodo residual crudo

Tabla N° 9: Concentración promedio (n=3) de patógenos presentes en el lodo residual crudo de piscicultura de recirculación.

Componente	Muestreo				
	Marzo	Mayo	Julio	Septiembre	Octubre
<i>salmonella sp.</i> NMP/g de sólidos totales	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
Coliformes fecales NMP/4g de sólidos totales	24,0	35,7	413,7	10,3	2,0

2 Análisis estadístico

El software donde se realizaron todos los análisis estadísticos es Statistica v7.0. El análisis estadístico usado en este trabajo corresponde a un test de Kruskal-Wallis para encontrar un patrón en la tendencia de los datos. A continuación las figuras correspondientes a la variabilidad promedio (n=3) de componentes en el lodo residual crudo para piscicultura de flujo abierto.

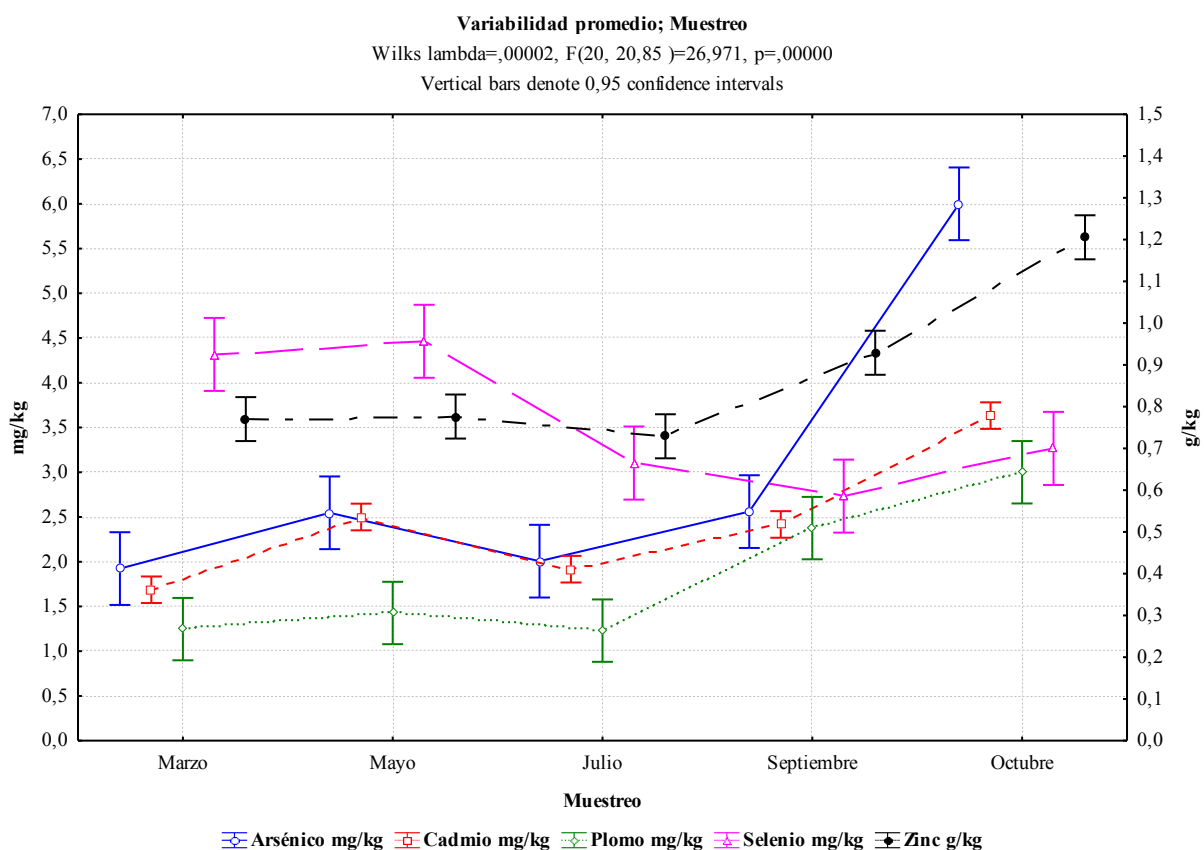


Figura N° 26: Variabilidad promedio (n=3) de metales en el lodo residual de piscicultura de flujo abierto.

De acuerdo a la figura anterior se observa el mismo patrón de tendencia para todos los componentes en todo el periodo de estudio, a excepción del Selenio que presenta claramente una tendencia a la baja desde el mes de Mayo. Para el resto de los metales desde el mes Julio las concentraciones comienzan a aumentar, el componente Arsénico en el último mes de muestreo

alcanzó 6 mg/kg base seca. Para el Zinc la concentración observada es mayor que todos los demás componentes, pero aun siendo alta esta concentración sigue el mismo patrón de tendencia para todo el periodo de estudio alcanzando un máximo de 1,2 g/kg base seca para el mes de Octubre. Se puede observar además que la concentración de Plomo siempre está por debajo de los demás componentes analizados.

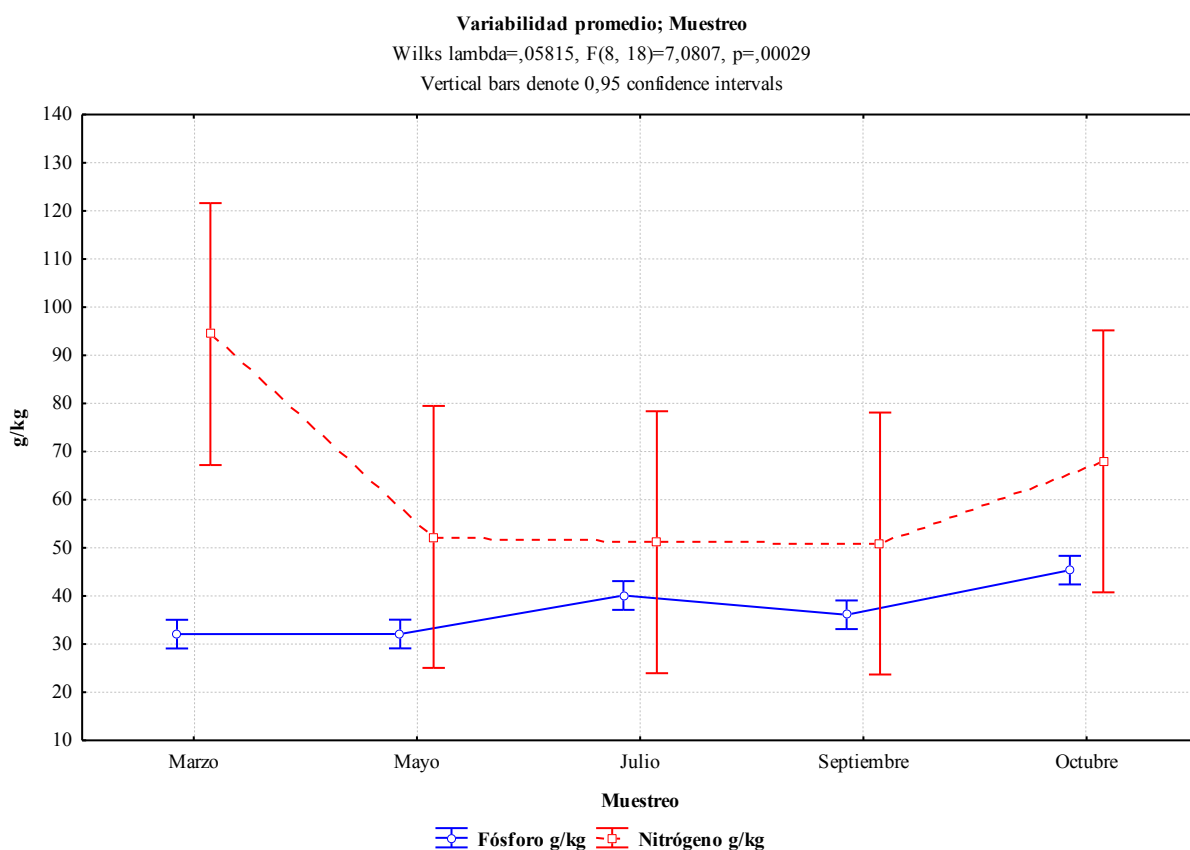


Figura N° 27: Variabilidad promedio (n=3) de Fósforo total y Nitrógeno total en el lodo residual de piscicultura de flujo abierto.

Según la figura N°27, el contenido de Nitrógeno total desde el mes de Mayo a Septiembre se mantiene constante, luego desde el mes de Septiembre presenta un leve incremento en su concentración alcanzando un valor promedio de 68 g/kg base seca, además se puede observar que la desviación de los datos obtenidos dentro de cada mes de muestreo es alta. El Fósforo total tiene claramente un patrón de tendencia a la alza desde el primer mes de muestreo alcanzando un valor

máximo de 45,4 g/kg base seca en el mes de Octubre, pero aun así siempre está por debajo de la concentración de Nitrógeno total presente en el lodo residual.

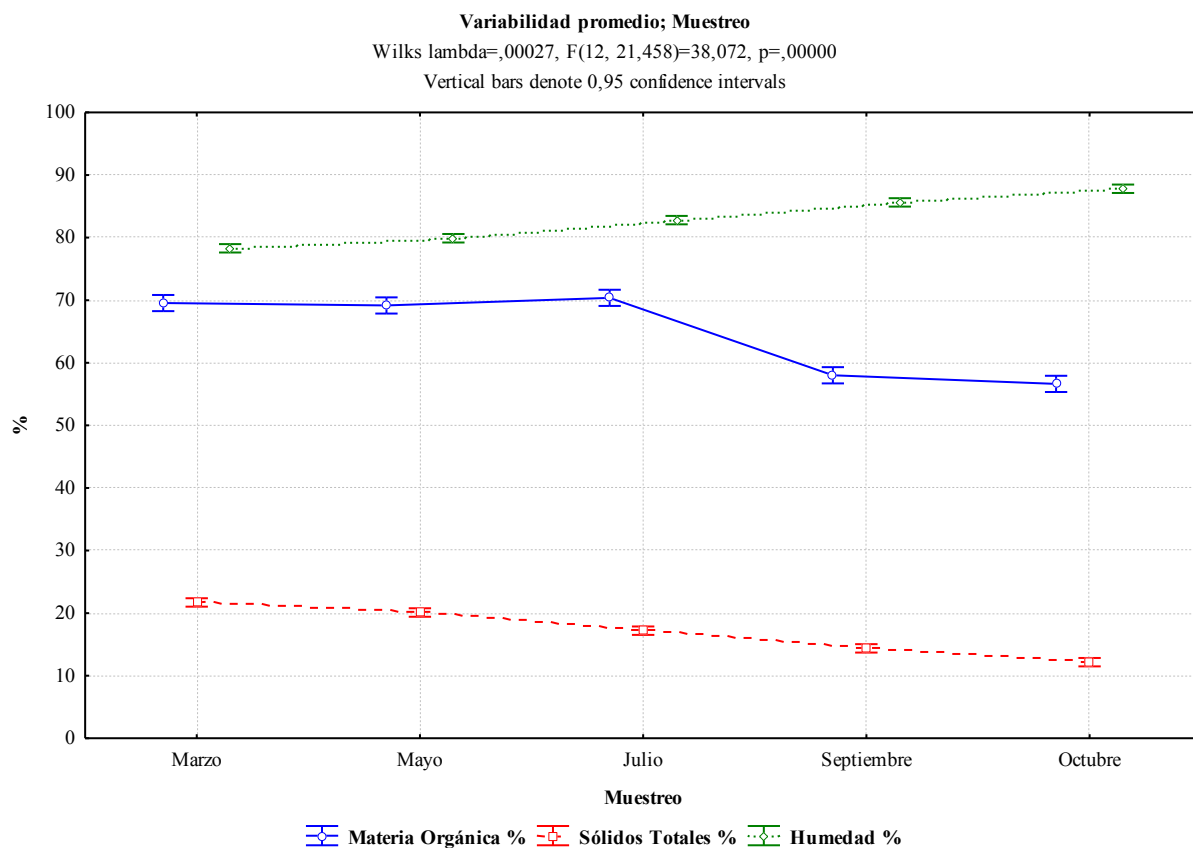


Figura N° 28: Variabilidad promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad en el lodo residual de piscicultura de flujo abierto.

La figura N°28 indica que el contenido de materia orgánica presente en el lodo residual crudo se mantiene constante desde el mes de Marzo hasta Julio, luego presenta una tendencia a la baja en los siguientes meses de muestreo alcanzando un mínimo de 58% en el mes de Octubre. Se observa una baja desviación de los datos dentro de cada mes de muestreo. Entre los meses de Julio y Septiembre se aprecia una disminución considerable en la concentración el porcentaje de materia orgánica. Respecto de los sólidos totales presente en el lodo residual se observa una disminución desde el mes de Marzo, llegando a un mínimo de 12,2% en el mes de Octubre.

Las figuras mostradas a continuación corresponden a los componentes presentes en el lodo residual para piscicultura de recirculación:

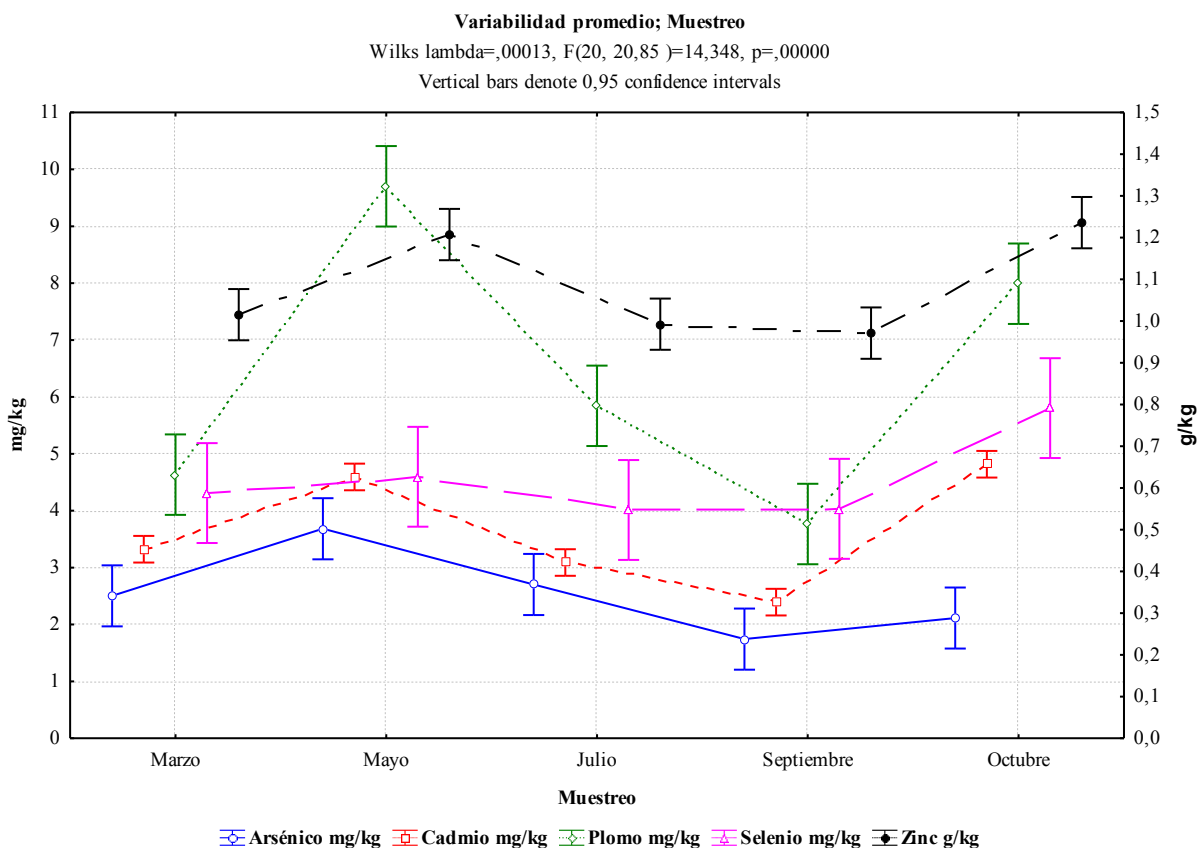


Figura N° 29: Variabilidad promedio (n=3) de metales en el lodo residual crudo de piscicultura de recirculación.

Según la figura N°29 se observa que todos los componentes de metales presentes en lodo crudo tienen el mismo patrón de tendencia para todos los meses de muestreos, a excepción del Plomo que en el mes Mayo registra un máximo en su concentración presente en el lodo residual alcanzando un valor de 9,7 g/kg base seca. La concentración de Selenio se mantiene constante a lo largo de todo el periodo de estudio, presentando un máximo de 5,8 mg/kg base seca en el mes de Octubre. Cabe señalar que la concentración de Arsénico presente en el lodo residual crudo se

mantiene siempre por debajo de los demás componentes analizados en todo periodo del estudio, pero aun así tiene el mismo patrón de tendencia.

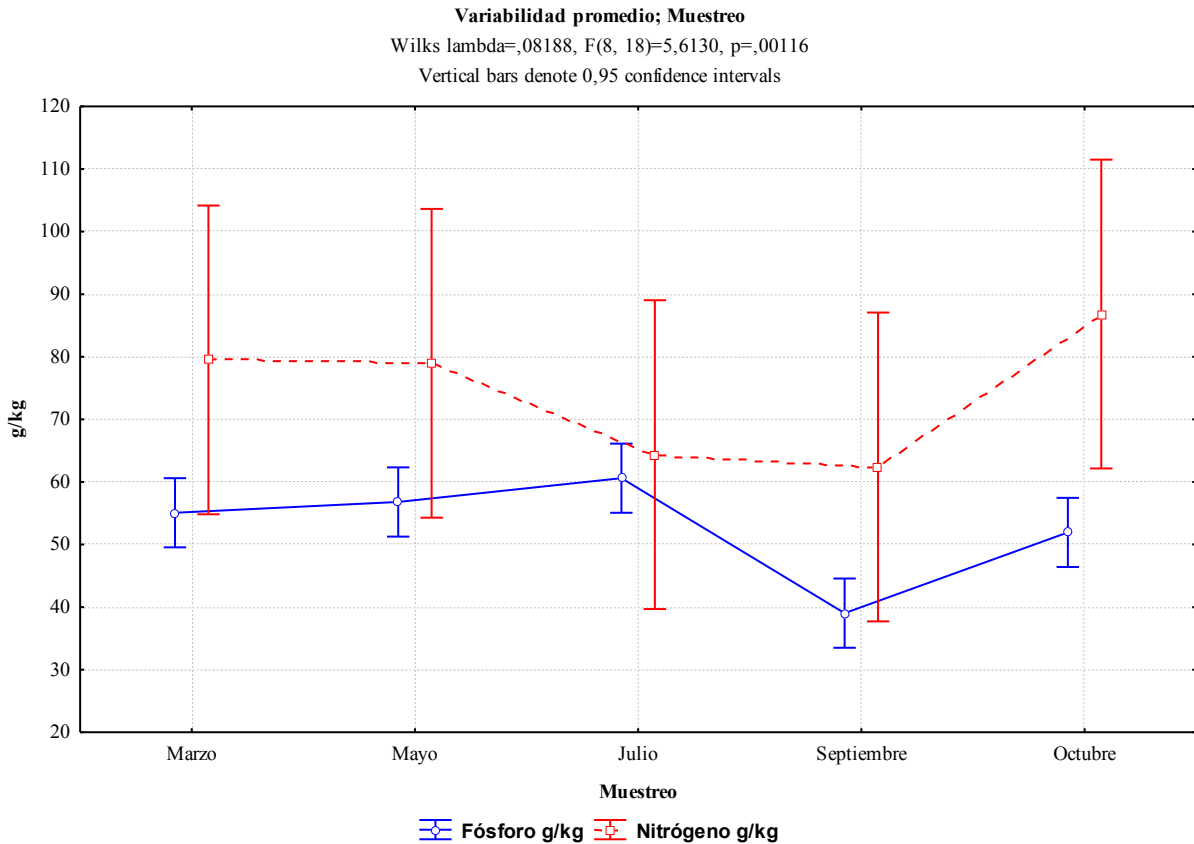


Figura N° 30: Variabilidad promedio (n=3) de Fósforo total y Nitrógeno total en el lodo residual crudo de piscicultura de recirculación.

Según la figura anterior la concentración de Nitrógeno total presenta una disminución en su concentración presente en el lodo residual desde el mes de Mayo a Septiembre, llegando a un mínimo de 62,4 g/kg base seca en el mes de Septiembre. Se observa que la desviación de los datos obtenido en cada mes de muestreo es alta, a comparación de la desviación obtenida para el Fosforo total que es mucho menor. El Fósforo total tiene una clara disminución en su concentración desde el mes Julio a Septiembre alcanzando un mínimo de 39 g/kg base seca. Cabe

señalar que la concentración de Fósforo total siempre está por debajo de la concentración de Nitrógeno total presente en el lodo residual crudo.

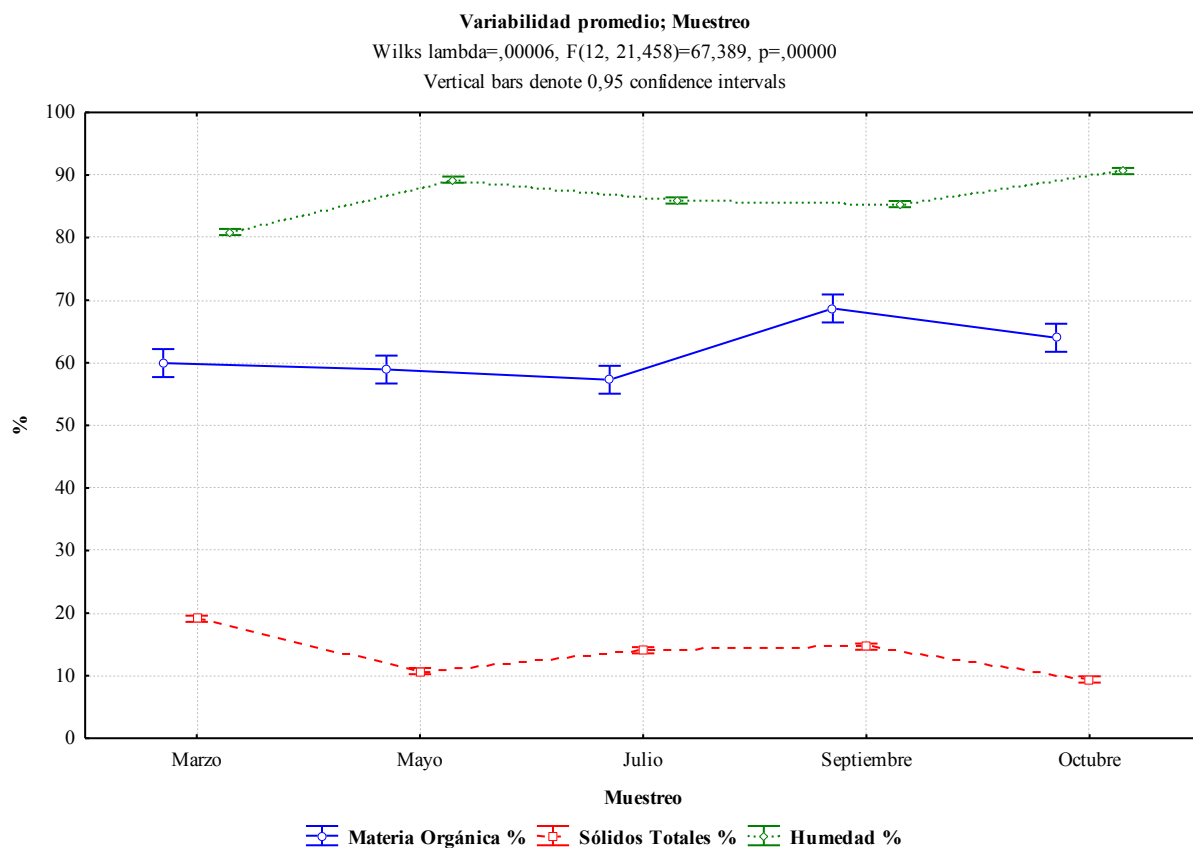


Figura N° 31: Variabilidad promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad en el lodo residual crudo de piscicultura de recirculación.

De acuerdo a la figura anterior, el contenido de materia orgánica presente en el lodo residual crudo no presenta variabilidad entre los meses de Marzo y Julio. El valor más alto se registra en el mes de Septiembre alcanzando un 68,7%. Respecto del contenido de sólidos totales en el lodo residual crudo se observa una disminución hacia finales del periodo de muestreo, llegando a un mínimo de 9,4% en el mes de Octubre.

Para determinar si existen diferencias en cada muestreo y por componente, se realizó un test de Kruskal-Wallis, obteniendo los siguientes resultados para cada piscicultura:

Tabla N° 10: Test Kruskal-Wallis.

Kruskal-Wallis ANOVA by Ranks						
Componente	Unidad	n	Piscicultura flujo abierto		Piscicultura recirculación	
			H	p	H	p
Arsénico total	mg/kg	15	11,90	0,02	10,05	0,04
Cadmio total	mg/kg	15	12,59	0,01	12,90	0,01
Mercurio total	mg/kg	15	0,00	1,00	0,00	1,00
Plomo total	mg/kg	15	12,39	0,01	13,50	0,01
Selenio total	mg/kg	15	12,39	0,01	7,87	0,10
Zinc total	mg/kg	15	11,23	0,02	11,17	0,02
Fósforo total	g/kg	15	11,75	0,02	11,10	0,03
Nitrógeno total	g/kg	15	8,23	0,08	2,07	0,72
Materia orgánica	%	15	0,00	1,00	11,60	0,02
Sólidos totales	%	15	13,52	0,01	13,23	0,01
Humedad	%	15	13,50	0,01	12,23	0,01
Coliformes fecales	NMP/4g	15	10,78	0,03	10,10	0,04

De acuerdo a la tabla anterior, se puede observar que Arsénico, Cadmio, Plomo, Selenio, Zinc, Fósforo total, Sólidos totales, Humedad y Coliformes fecales para ambas piscicultura presentan variabilidad en todo el periodo de estudio. En el caso de materia orgánica para piscicultura de flujo abierto no se observan diferencias significativas, pero si para la piscicultura de recirculación con el valor de $p < 0,05$. Por lo tanto, estos componentes nombrados presentan una leve variabilidad en todo el estudio.

Para la piscicultura de recirculación los componentes Arsénico, Cadmio, Plomo, Selenio, Zinc, Fósforo total, Materia orgánica, Sólidos totales, Humedad y Coliformes fecales presentan diferencias significativas por muestreo, obteniéndose un p igual a 0,02 para todos los componentes nombrados anteriormente.

A continuación Test de Mann-Whitney para encontrar diferencias entre pisciculturas:

Tabla N° 11: Test Mann-Whitney.

Mann-Whitney U Test (Base Estadística) By variable Piscicultura Marked tests are significant at $p < 0,05000$										
Componente	Rank Sum flujo abierto	Rank Sum recirculación	U	Z	p-level	Z adjusted	p-level	Valid N flujo abierto	Valid N recirculación	2*1sided exact p
Arsénico total	234,0000	231,0000	111,0000	0,06222	0,950390	0,06223	0,950379	15	15	0,967417
Cadmio total	159,0000	306,0000	39,0000	-3,04864	0,002299	-3,04898	0,002296	15	15	0,001665
Mercurio total	232,5000	232,5000	112,5000	0,00000	1,000000			15	15	
Plomo total	120,0000	345,0000	0,0000	-4,66628	0,000003	-4,67148	0,000003	15	15	0,000000
Selenio total	162,0000	303,0000	42,0000	-2,92420	0,003454	-2,92453	0,003450	15	15	0,002702
Zinc total	156,0000	309,0000	36,0000	-3,17307	0,001508	-3,17307	0,001508	15	15	0,000997
Fósforo total	139,0000	326,0000	19,0000	-3,87820	0,000105	-3,87863	0,000105	15	15	0,000027
Nitrógeno total	202,0000	263,0000	82,0000	-1,26508	0,205843	-1,26508	0,205843	15	15	0,216857
Materia Orgánica	257,0000	208,0000	88,0000	1,01621	0,309529	1,01667	0,309314	15	15	0,324548
Sólidos Totales	290,0000	175,0000	55,0000	2,38499	0,017080	2,38525	0,017068	15	15	0,016432
Humedad	175,0000	290,0000	55,0000	-2,38499	0,017080	-2,38499	0,017080	15	15	0,016432
Coliformes Fecales	271,0000	194,0000	74,0000	1,59691	0,110288	1,59904	0,109812	15	15	0,115979

Para este análisis estadístico se agruparon los datos registrados en todos los meses del presente estudio ya que en teoría provienen de la misma población (piscicultura), es decir, se asumió que venían de una misma población aun cuando mostraban variabilidad de los datos.

El test de Mann-Whitney No paramétrico es ideal para comparar dos grupos, siendo en este caso un grupo los datos de piscicultura de flujo abierto y otro grupo los resultados de piscicultura de recirculación.

Cabe señalar que el número de réplicas n total para cada componente analizado fue de 15 distribuido uniformemente en todo el periodo de estudio.

Se puede inferir que sólo los componentes Cadmio, Plomo, Selenio, Zinc, Fósforo total, Sólidos totales y Humedad presentan diferencias significativas con un $p < 0,05$. No así los componentes Arsénico, Mercurio, Nitrógeno total, Materia orgánica y Coliformes fecales que no presentan diferencias significativas entre ambas pisciculturas.

3 Resultados de la digestión anaerobia en lodos residuales de piscicultura

La digestión es un proceso ampliamente usado para la degradación de la materia orgánica en diferentes tipos de sustratos. El propósito de estudio de este proceso en el lodo residual de piscicultura es observar su eficiencia sobre este tipo de residuo en relación a la disminución de materia orgánica.

Desde las tablas N°12 y N°27 se presentan los resultados referidos a las propiedades físico – químicas y biológicas del lodo residual crudo y lodo residual digerido para cada uno de los tratamientos de digestión anaerobia (sin inóculo y con inóculo) de las muestras obtenidas en los meses de Marzo y Septiembre. Los resultados permiten analizar el efecto de la digestión anaeróbica sobre aquellos parámetros de interés (Materia orgánica, patógenos y parásitos) para posterior aplicación del lodo residual en suelos.

El proceso de digestión anaerobia aplicado a los lodos residuales de piscicultura bajo condiciones mesofílicas (35-40°C) tiene un efecto positivo sobre el contenido de patógenos y parásitos, lo cual coincide con los resultados obtenidos Rojas *et al.*, 2000. En efecto, este tratamiento permite disminuir el contenido de coliformes fecales, además se observa una disminución de un 86% para ambas pisciculturas y la eliminación de *salmonella sp.* en todas las muestras sometidas a este proceso.

De acuerdo a la normativa de referencia DS04/09, para que un lodo residual pueda ser aplicado en suelos como fertilizante o mejorador de suelos, debe tener un máximo de coliformes fecales igual 1000 número más probable (NMP) por cada gramo (g) de sólidos totales (ST) y una concentración máxima de *salmonella sp.* igual a 3 NMP/4g de ST. El lodo residual digerido de

ambos tipos de piscicultura presenta valores de coliformes fecales menor a 1,8 NMP/4g de ST y ausencia de *salmonella sp.* por lo que está dentro de los valores exigidos por la norma.

Durante todo el periodo de estudio el contenido de ovas de helminto fue <1,0 ova por cada 4 gramos de ST y el efecto de la digestión anaerobia no tuvo incidencia sobre su contenido, de cualquier forma los valores están por debajo de lo que establece la norma DS04/09.

Al finalizar el tratamiento de digestión anaerobia con y sin la presencia de inóculo para ambas pisciculturas en estudio (de flujo abierto y de recirculación), los componentes que se nombran a continuación presentaron valores <1,0 expresados en NMP/4g de ST: *Áscaris* total, *Diphyllobothrium* total, *Dipylidium* total, *Hymenolepis* total, *Taenia* total, *Toxocara* total, *Trichiuris* total, *Trichosomoides* total.

Aunque no se observan diferencias referidas al tratamiento con y sin inóculo para patógenos y parásitos, este proceso tiene un efecto importante sobre la eficiencia en la disminución de la Materia orgánica (M.O.). De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que para piscicultura de flujo abierto y piscicultura de recirculación el contenido de Materia orgánica disminuye en un 13,5% y 16,2% respectivamente, en un periodo igual a 120 días sin la presencia de inóculo. En tanto que para un periodo de tiempo igual a 56 días con presencia de inóculo la Materia orgánica se reduce en un 11,7% para piscicultura de flujo abierto y para piscicultura de recirculación disminuye en un 18,4% (Figura N°44).

En relación a los sólidos totales ambos tipos de lodos residuales tienen un comportamiento diferente tanto en el tratamiento con inóculo como sin inóculo. El lodo residual que proviene de una piscicultura de flujo abierto aumento su contenido de sólidos totales en un 16% y 23% durante el tratamiento sin y con inóculo respectivamente. Mientras que el lodo

residual de la piscicultura de recirculación disminuye su contenido de sólidos totales al final del proceso en un 26% para el tratamiento con inóculo.

Los resultados permiten observar que el contenido de Fósforo total (P total) en muestras de lodos residuales digestados de ambos tipos de piscicultura aumenta su concentración, independiente del tipo de tratamiento (con y sin inóculo).

La concentración de Nitrógeno total (N total) varía de acuerdo a la variación de los sólidos totales al final del proceso, observándose un aumento en piscicultura de flujo abierto y una disminución en piscicultura de recirculación.

Aunque el proceso de digestión anaerobia como sistema de tratamiento no debe tener efecto en la concentración de metales, la variación observada en lodo residual digestado respecto del lodo residual crudo puede deberse a la variación en la concentración de sólidos totales. De acuerdo a la normativa de referencia, estos lodos presentan concentraciones muy por debajo exigidos por esta norma para poder ser aplicados en suelos.

3.1 Tratamiento de digestión anaerobia sin inóculo para lodos residuales crudos del mes de Marzo

3.1.1 Caracterización lodo residual digerido de piscicultura de flujo abierto

3.1.1.1 Metales presentes en el lodo residual digerido

Tabla N° 12: Comparación de la concentración promedio (n=3) de metales (mg/kg base seca) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de flujo abierto.

Componente	Piscicultura de flujo abierto	
	Lodo crudo	Lodo digerido
Arsénico total	1,9	5,1
Cadmio total	1,7	3,8
Mercurio total	<1,0	<1,0
Plomo total	1,2	2,5
Selenio total	4,3	2,7
Zinc total	770,1	1189,3

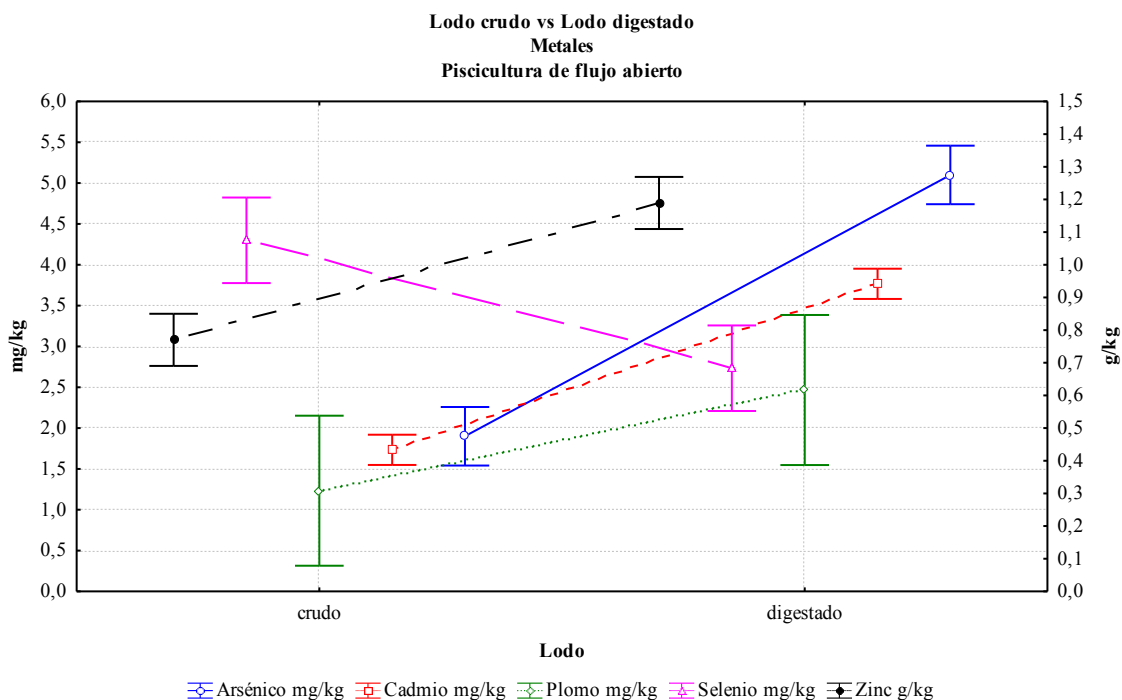


Figura N° 32: Comparación de la concentración promedio (n=3) de metales del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento sin inóculo para piscicultura de flujo abierto.

3.1.1.2 Componentes orgánicos presentes en el lodo residual digerido

Tabla N° 13: Comparación en el contenido promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) (g/kg base seca) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de flujo abierto.

Componente	Piscicultura de flujo abierto	
	Lodo crudo	Lodo digerido
P total	32,1	43,3
N total	94,4	42,1

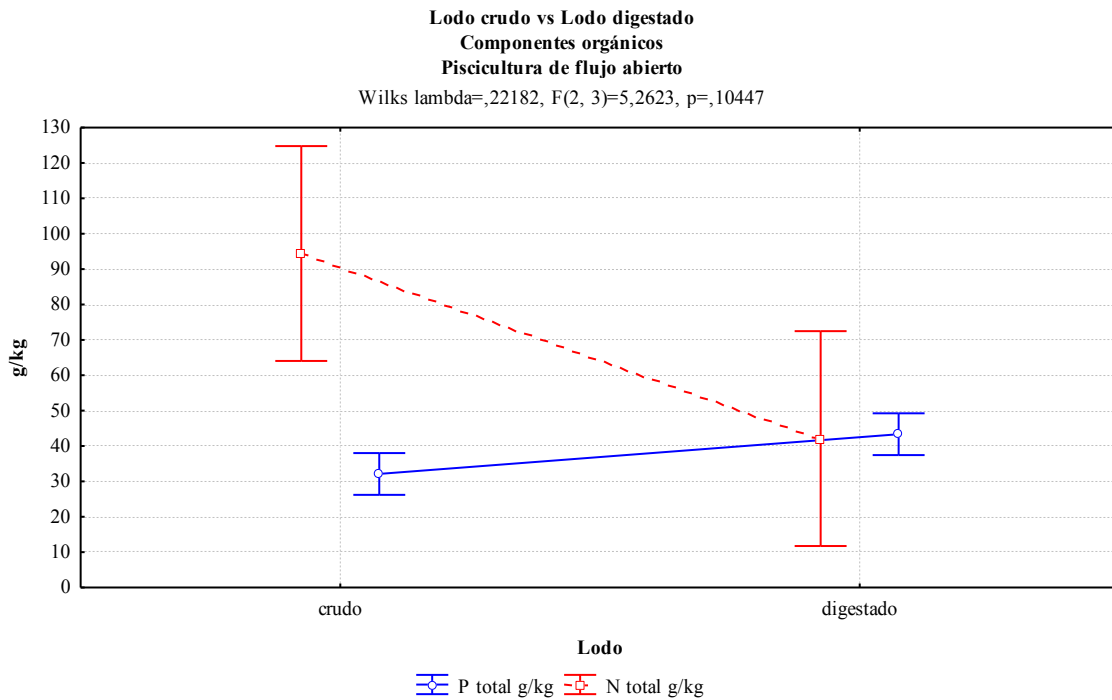


Figura N° 33: Comparación de la concentración promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento sin inóculo para piscicultura de flujo abierto.

Tabla N° 14: Comparación en el contenido promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad expresados en porcentaje (%) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de flujo abierto.

Componente	Piscicultura de flujo abierto	
	Lodo crudo	Lodo digerido
Materia orgánica	69,6	60,2
Sólidos totales	21,7	25,2
Humedad	78,3	74,8

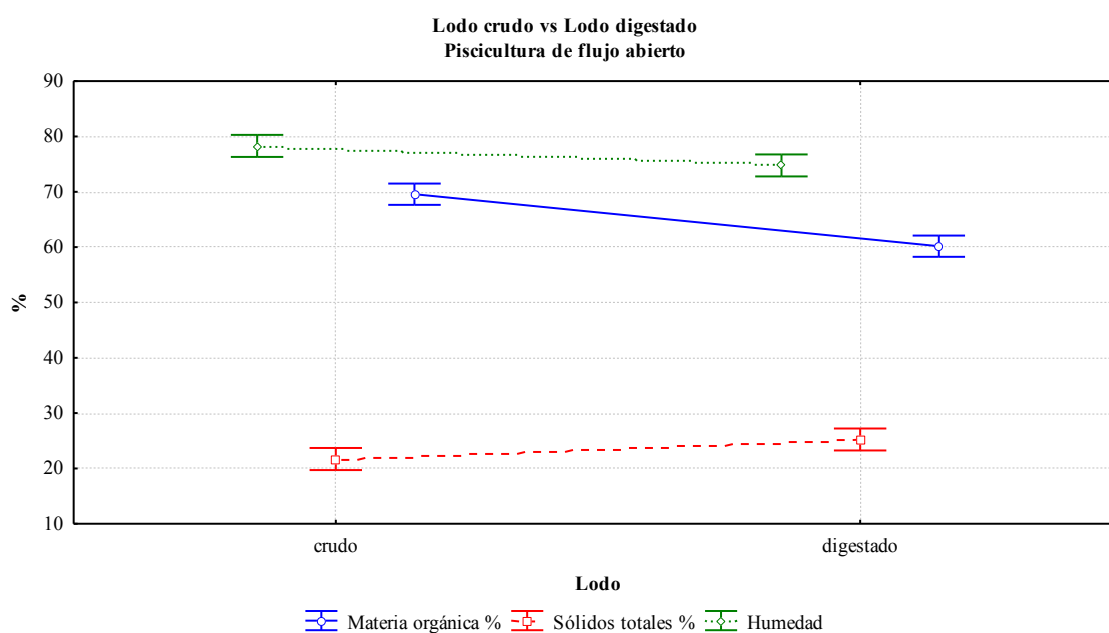


Figura N° 34: Comparación de la concentración promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento sin inóculo para piscicultura de flujo abierto.

3.1.1.3 Patógenos presentes en el lodo residual digerido

Tabla N° 15: Comparación de la concentración promedio (n=3) de patógenos entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de flujo abierto.

Componente	Piscicultura de flujo abierto	
	Lodo crudo	Lodo digerido
<i>salmonella sp.</i> NMP/g de sólidos totales	Presencia	Ausencia
Coliformes fecales NMP/4g de sólidos totales	13	<1,8

3.1.2 Caracterización lodo residual digerido de piscicultura de recirculación

3.1.2.1 Metales presentes en el lodo residual digerido

Tabla N° 16: Comparación de la concentración promedio (n=3) de metales (mg/kg base seca) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de recirculación.

Componente	Piscicultura de recirculación	
	Lodo crudo	Lodo digerido
Arsénico total	2,5	3,5
Cadmio total	3,3	5,5
Mercurio total	<1,0	<1,0
Plomo total	4,6	9,5
Selenio total	4,3	4,6
Zinc total	1015,4	1500,4

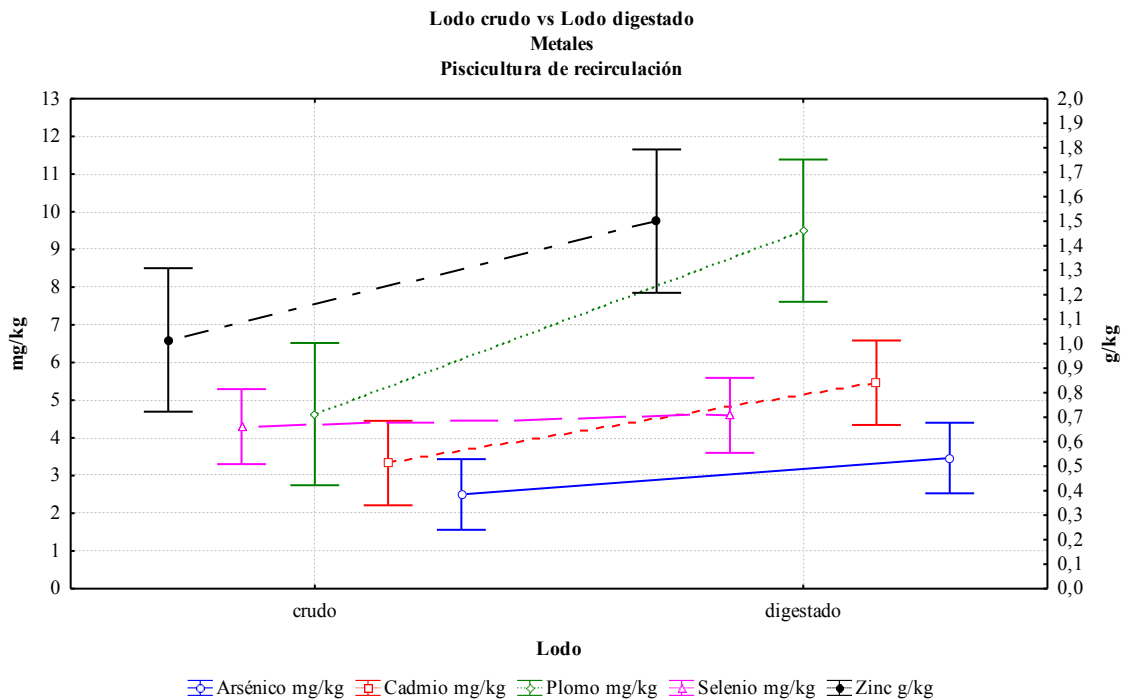


Figura N° 35: Comparación de la concentración promedio (n=3) de metales del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento sin inóculo para piscicultura de recirculación.

3.1.2.2 Componentes orgánicos presentes en el lodo residual digerido

Tabla N° 17: Comparación en el contenido promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) (g/kg base seca) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de recirculación.

Componente	Piscicultura de recirculación	
	Lodo crudo	Lodo digerido
P total	55,1	66,8
N total	79,5	76,4

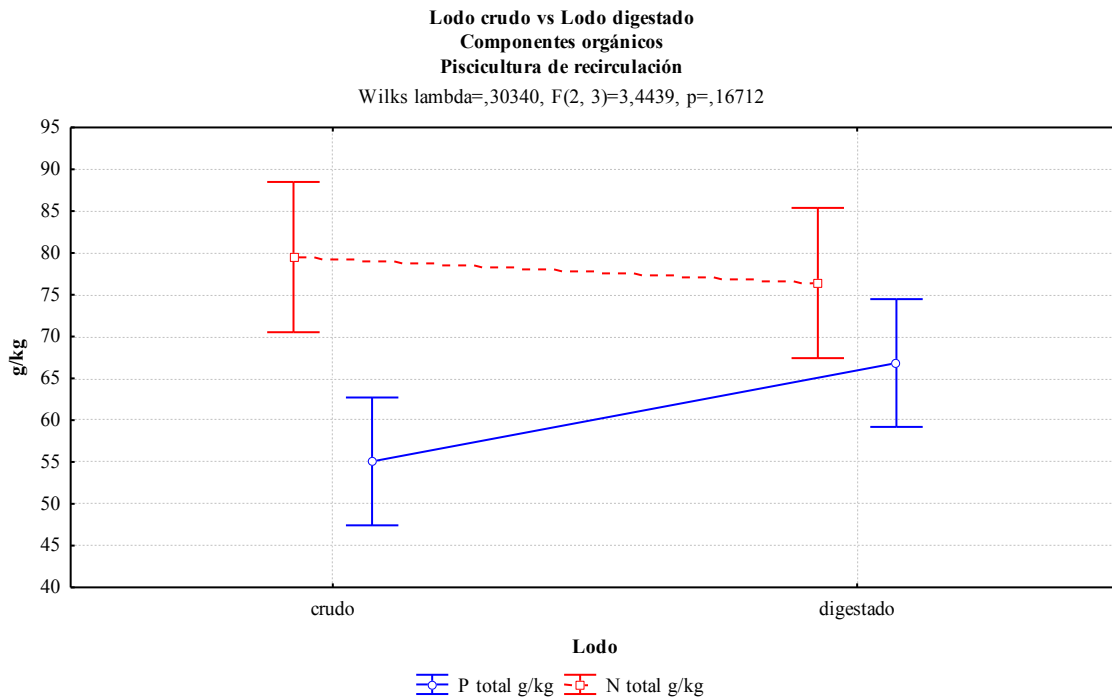


Figura N° 36: Comparación de la concentración promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento sin inóculo para piscicultura de recirculación.

Tabla N° 18: Comparación en el contenido promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad expresados en porcentaje (%) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de recirculación.

Componente	Piscicultura de recirculación	
	Lodo crudo	Lodo digerido
Materia orgánica	60,0	50,3
Sólidos totales	19,1	18,0
Humedad	80,9	82,0

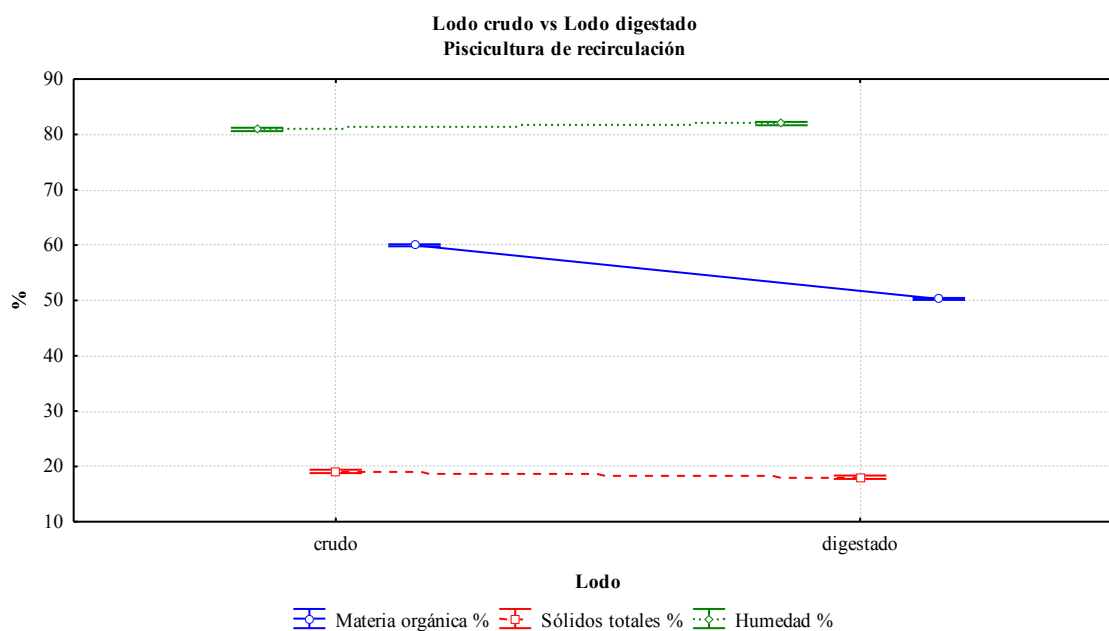


Figura N° 37: Comparación de la concentración promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento sin inóculo para piscicultura de recirculación.

3.1.2.3 Patógenos presentes en el lodo residual digerido

Tabla N° 19: Comparación de la concentración promedio (n=3) de patógenos entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de recirculación.

Componente	Piscicultura de recirculación	
	Lodo crudo	Lodo digerido
<i>salmonella sp.</i> NMP/g de sólidos totales	Presencia	Ausencia
Coliformes fecales NMP/4g de sólidos totales	24	<1,8

3.2 Tratamiento de digestión anaerobia con inóculo para lodos residuales crudos del mes de Septiembre

3.2.1 Caracterización de lodo residual digerido para piscicultura de flujo abierto

3.2.1.1 Metales presentes en el lodo residual digerido

Tabla N° 20: Comparación de la concentración promedio (n=3) de metales (mg/kg base seca) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de flujo abierto.

Componente	Piscicultura de flujo abierto	
	Lodo crudo	Lodo digerido
Arsénico total	2,6	2,5
Cadmio total	2,4	3,0
Mercurio total	<1,0	<1,0
Plomo total	2,4	1,9
Selenio total	2,7	2,3
Zinc total	929,1	1117,8

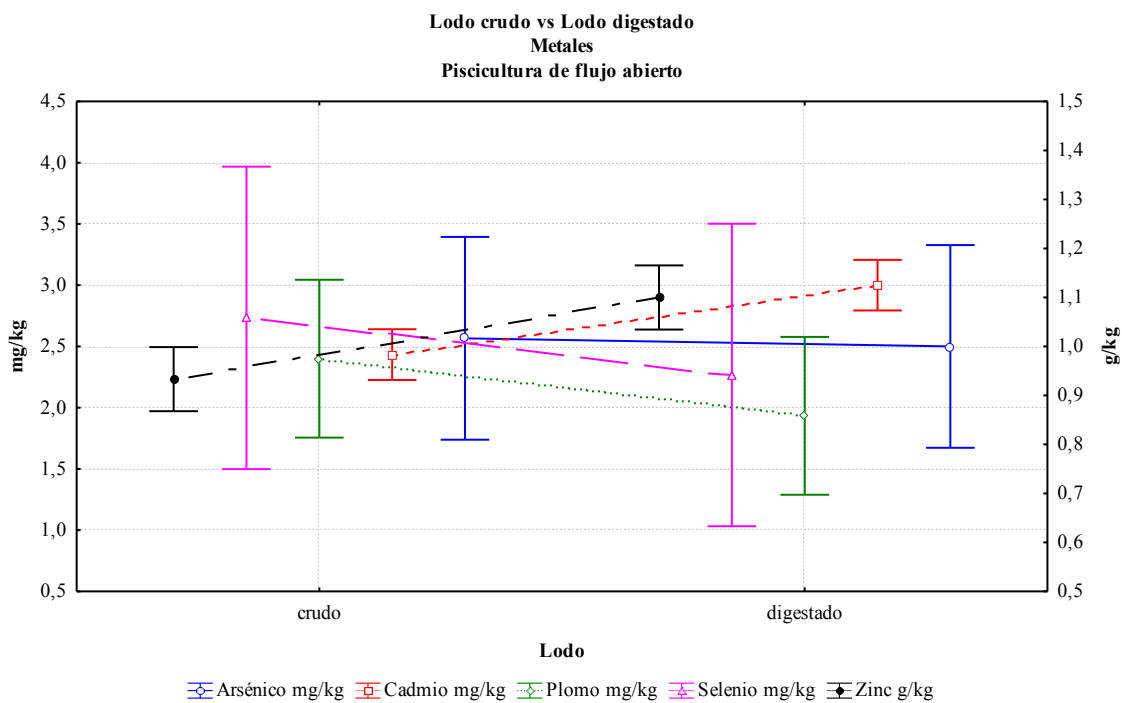


Figura N° 38: Comparación de la concentración promedio (n=3) de metales del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento con inóculo para piscicultura de flujo abierto.

3.2.1.2 Componentes orgánicos presentes en el lodo residual digerido

Tabla N° 21: Comparación en el contenido promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) (g/kg base seca) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de flujo abierto.

Componente	Piscicultura de flujo abierto	
	Lodo crudo	Lodo digerido
P total	36,1	56,8
N total	50,9	65,0

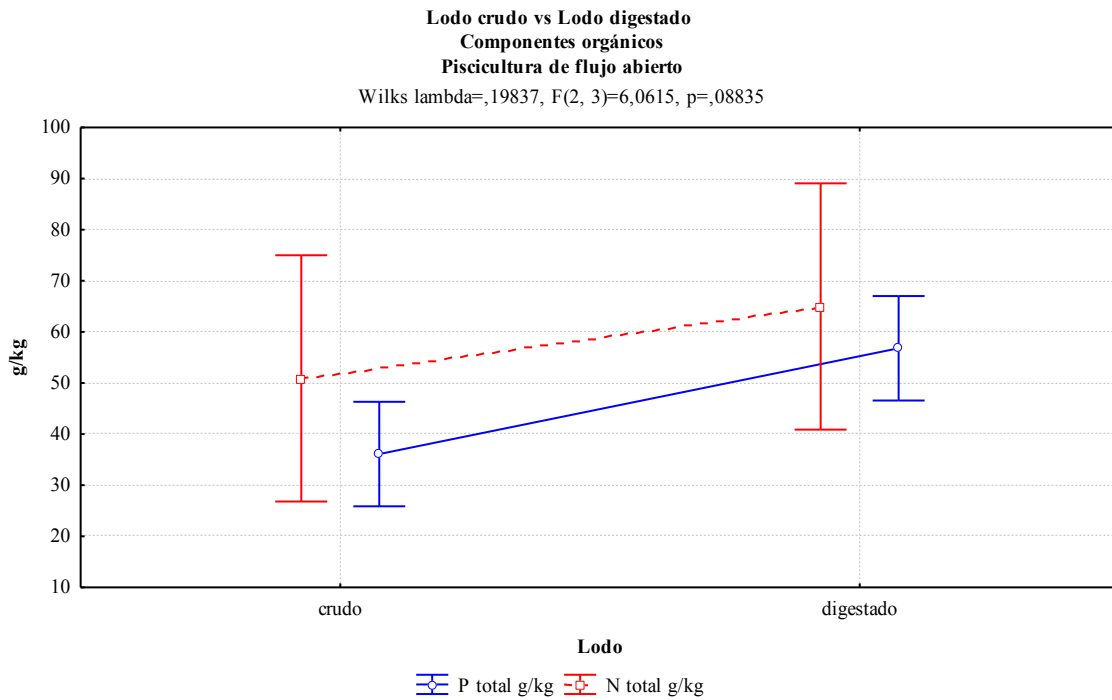


Figura N° 39: Comparación de la concentración promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento con inóculo para piscicultura de flujo abierto.

Tabla N° 22: Comparación en el contenido promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad expresados en porcentaje (%) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de flujo abierto.

Componente	Piscicultura de flujo abierto	
	Lodo crudo	Lodo digerido
Materia orgánica	58,0	51,1
Sólidos totales	14,4	17,6
Humedad	85,6	82,4

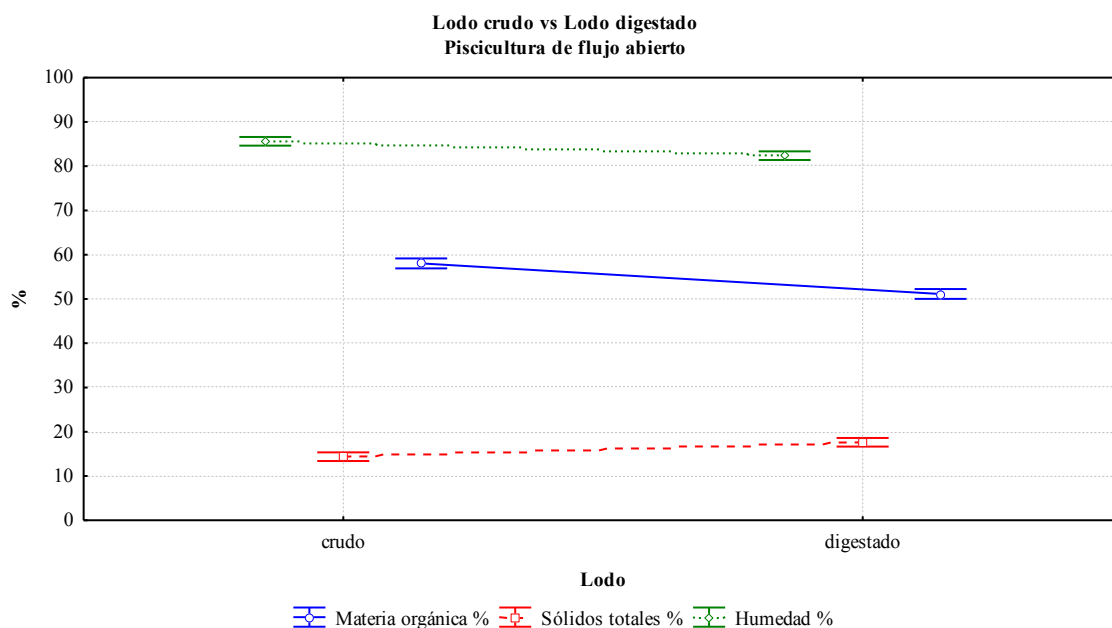


Figura N° 40: Comparación de la concentración promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento con inóculo para piscicultura de flujo abierto.

3.2.1.3 Patógenos presentes en lodo residual digerido

Tabla N° 23: Comparación de la concentración promedio (n=3) de patógenos entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de flujo abierto.

Componente	Piscicultura de flujo abierto	
	Lodo crudo	Lodo digerido
<i>salmonella sp.</i> NMP/g de sólidos totales	Presencia	Ausencia
Coliformes fecales NMP/4g de sólidos totales	18	<1,8

3.2.2 Caracterización de lodo residual digerido para piscicultura de recirculación

3.2.2.1 Metales presentes en el lodo residual digerido

Tabla N° 24: Comparación de la concentración promedio (n=3) de metales (mg/kg base seca) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de recirculación.

Componente	Piscicultura de recirculación	
	Lodo crudo	Lodo digerido
Arsénico total	1,7	1,9
Cadmio total	2,4	4,1
Mercurio total	<1,0	<1,0
Plomo total	3,8	8,9
Selenio total	4,1	4,8
Zinc total	971,3	1588,7

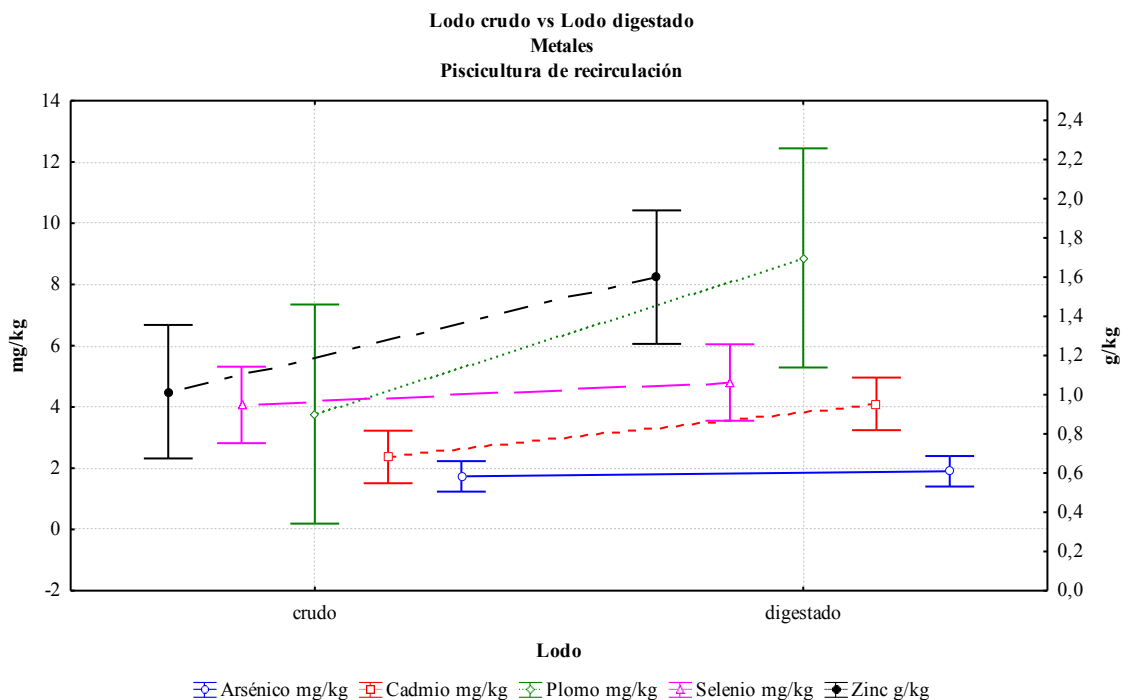


Figura N° 41: Comparación de la concentración promedio (n=3) de metales del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento con inóculo para piscicultura de recirculación.

3.2.2.2 Componentes orgánicos presentes en el lodo residual digerido

Tabla N° 25: Comparación en el contenido promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) (g/kg base seca) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de recirculación.

Componente	Piscicultura de recirculación	
	Lodo crudo	Lodo digerido
P total	47,9	59,7
N total	57,9	101,0

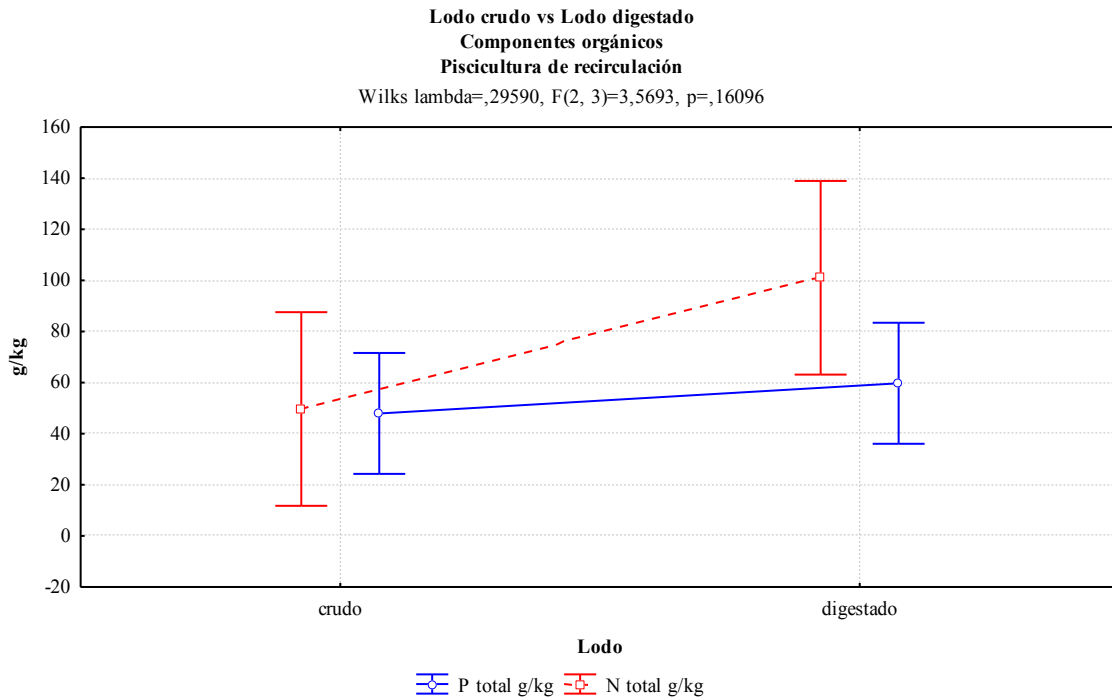


Figura N° 42: Comparación de la concentración promedio (n=3) de Fósforo total (P total) y Nitrógeno total (N total) del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento con inóculo para piscicultura de recirculación.

Tabla N° 26: Comparación en el contenido promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad expresados en porcentaje (%) entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de recirculación.

Componente	Piscicultura de recirculación	
	Lodo crudo	Lodo digerido
Materia orgánica	68,7	56,1
Sólidos totales	14,6	10,7
Humedad	85,4	89,3

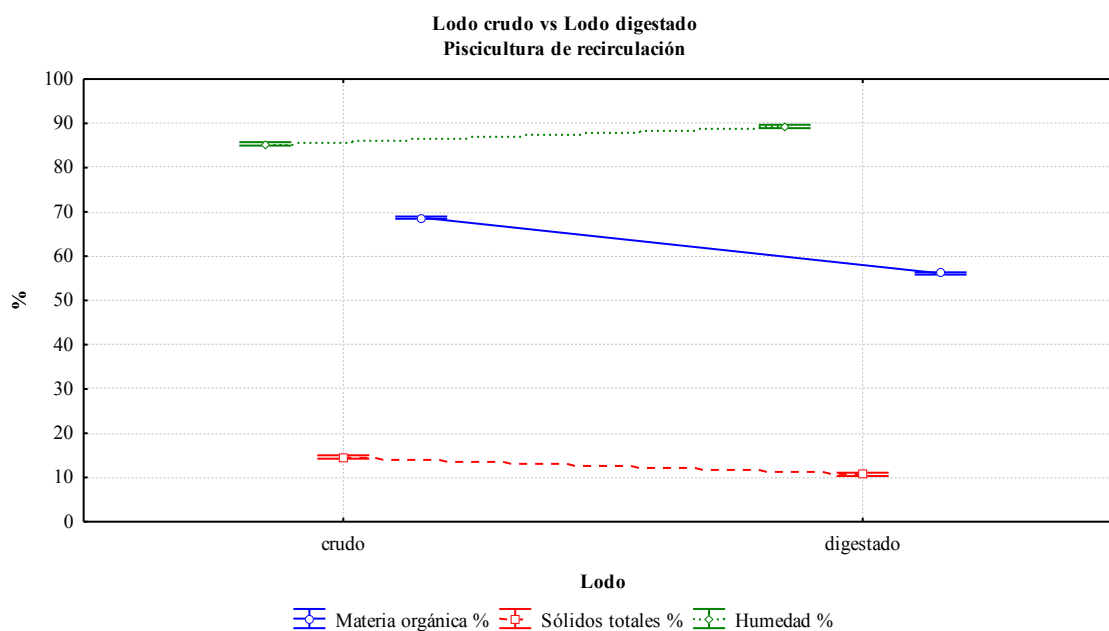


Figura N° 43: Comparación de la concentración promedio (n=3) de Materia orgánica, Sólidos totales y Humedad del lodo residual crudo versus lodo residual digerido, tratamiento con inóculo para piscicultura de recirculación.

3.2.2.3 Patógenos presentes en lodo residual digerido

Tabla N° 27: Comparación de la concentración promedio (n=3) de patógenos entre el lodo residual crudo y lodo residual digerido para piscicultura de recirculación.

Componente	Piscicultura de recirculación	
	Lodo crudo	Lodo digerido
<i>salmonella sp.</i> NMP/g de sólidos totales	Presencia	Ausencia
Coliformes fecales NMP/4g de sólidos totales	14	<1,8

Lodo crudo vs Lodo digerado
Materia orgánica
Tratamiento con y sin inóculo
Piscicultura de flujo abierto y recirculación
 Wilks lambda=,00012, F(4, 1)=2048,8, p=,01657

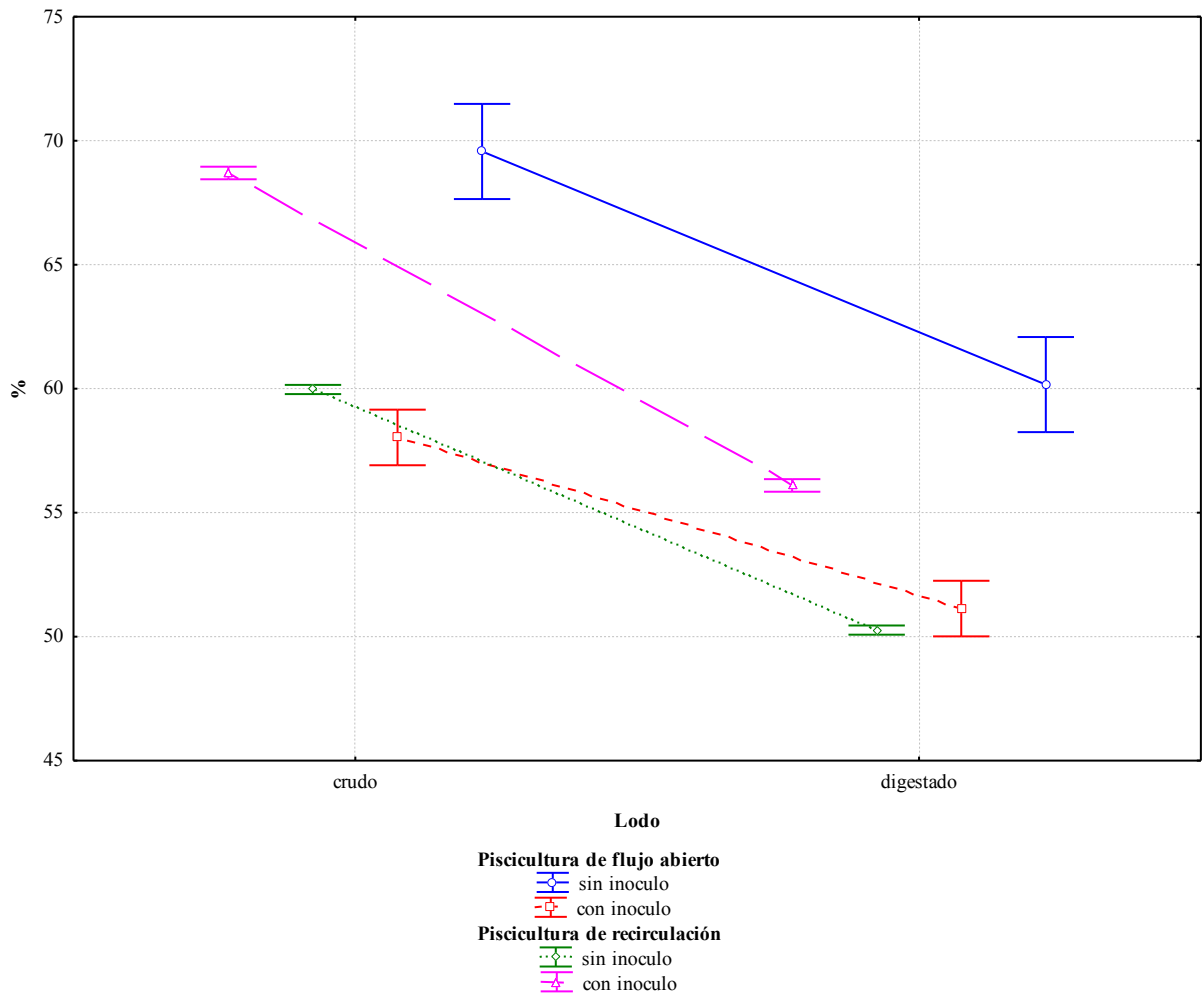


Figura N° 44: Comparación de la concentración promedio (n=3) de Materia orgánica del lodo residual crudo versus lodo residual digerado, tratamiento con y sin inóculo para piscicultura de flujo abierto y recirculación.

DISCUSION

La aplicación de lodos residuales en suelos se considera una alternativa a la disposición final en vertederos, ya que trae beneficios tanto ambientales como sociales, disminuyendo la actual presión en vertederos. En tal sentido, la determinación de aquellos parámetros críticos para lodos residuales derivados del cultivo del salmón, resulta fundamental para definir en su conjunto estrategias sobre su manejo y tratamiento.

El DS04/09 que establece las condiciones para aplicación de lodos provenientes del tratamiento de aguas servidas en suelos, ha sido el referente a partir del cual establece las condiciones para el manejo de lodos residuales de piscicultura (Anteproyecto actualmente en proceso consulta ciudadana). Ambos documentos coinciden con el tipo de parámetros, condiciones, exigencias sanitarias y ambientes para aplicar lodos residuales en suelos. Para estos efectos, se debe contar con requisitos que impone el actual anteproyecto de aplicación de lodos residuales, esto es una vez estabilizado e higienizado y ser sanitaria apto para su posterior aplicación en suelos.

En el lodo residual de ambas pisciculturas del presente estudio no se detectó la presencia de ninguno de los antibióticos analizados, situación que está de acuerdo con la estrategia de manejo que practica la empresa en estudio. Un análisis a los mismos antibióticos en el alimento que durante el muestreo de los lodos residuales fue usado por la empresa en el cultivo de sus peces, tampoco se detectó alguno de ellos.

Este tipo de residuo presenta un contenido de patógenos y parásitos que se encuentra por debajo del rango exigido por ambos reglamentos para la aplicación de lodos residuales en suelos.

Luego a partir de lo señalado anteriormente el lodo crudo residual de ambos tipos de pisciculturas presenta un estado de higienización óptimo para su aplicación en suelos. No obstante, a través de la digestión anaerobia en condición mesofílica (35–40°C) en estos residuos fue posible eliminar la presencia *salmonella sp.* y reducir el contenido de coliformes fecales en un 86%.

El contenido de metales analizado en el lodo residual crudo coincide con los resultados de la caracterización de lodos colectados bajo balsas jaulas y otros sitios de crianza (Salazar y Saldaña, 2007) que muestran un bajo contenido de metales (Cadmio, Cromo, Cobre, Níquel, Plomo y Zinc), niveles que se encuentran por debajo del límite establecido por la Normativa Chilena (CONAMA, en prensa) y de la Comunidad Económica Europea (Council of the European Communities, 1986) para el uso de lodos domésticos y biosólidos en suelo agrícolas.

Según lo estipulado en ambos reglamentos anteriormente mencionados, estos lodos residuales deberán cumplir con la concentración máxima de cada uno de los siguientes metales: 20 mg/kg de Arsénico (As), 8 mg/kg de Cadmio (Cd), 10 mg/kg de Mercurio (Hg), 300 mg/kg de Plomo (Pb), 50 mg/kg de Selenio (Se) y 2000 mg/kg de Zinc (Zn) en base seca. De acuerdo a los resultados de metales en lodos residuales ya sean crudos como lodos digestados obtenidos en el presente estudio, los valores se encuentran por debajo de la norma establecida (Tablas N°2, N°6, N°12, N°16, N°20 y N°24) por lo que para una posible aplicación en suelos estos residuos se consideran aptos y por tanto residuos no peligrosos (Anexo N°8 y N°9).

Las concentraciones de estos metales no muestran variaciones significativas del patrón de tendencia tanto entre los muestreos como entre pisciculturas. No obstante, cabe destacar que en el muestreo de Octubre la piscicultura de recirculación muestra valores más altos para el Plomo y el

Selenio que podría atribuirse principalmente al tipo de alimento que se le estaba suministrando a los peces en el periodo de muestreo (Anexo N°6).

Los resultados del análisis de Arsénico total, Nitrógeno total, Materia orgánica y coliformes fecales no muestran diferencias significativas entre pisciculturas (Tabla N°11). De acuerdo a estos resultados se puede inferir que los lodos de la piscicultura de flujo abierto se diferencian de los lodos de la piscicultura recirculación por tener mayor concentración de Zinc, Fósforo total y Humedad. Al relacionar estos resultados con los observados en el alimento que se suministra a los peces en cultivo era esperable que la piscicultura de recirculación presentara mayores concentraciones de Zinc y Fósforo total debido a que el alimento con que se suministra a los peces de esa piscicultura contenía mayores concentraciones de estos elementos, aun cuando no fueron significativas.

Los resultados en relación a la Materia orgánica presente en el lodo residual crudo de ambas pisciculturas, coinciden con los resultados obtenidos por Celis *et al.* (2006), que reporta el contenido de Materia orgánica fluctúa entre el rango 58 a 70% para lodos de piscicultura, pero difiere de los resultados de J Celisa *et al.* (2009) quienes reportaron un porcentaje de materia orgánica de 20,7 y 18,3% para lodos de piscicultura y pisciculturas lacustres respectivamente. Un elevado porcentaje de Materia orgánica en lodos residuales para posterior aplicación en suelos debe contribuir a la mejora de las condiciones de este (fertilización y actividad microbiana). Esto es coincidente con los estudios realizados por Teuber *et al.* (2007), quien declara que los lodos provenientes del cultivo del salmón deben permitir preservar y mejorar las características de los suelos evitando su deterioro.

Al comparar con otros residuos orgánicos como los desechos de ciudad o purines de lechería, los que pueden contener sobre 80% de Materia orgánica (Aguilera *et al.*, 1995) se puede apreciar que tanto los lodos residuales crudos como lodos residuales digestados presentan un menor porcentaje de materia orgánica, pero aun así son ricos para posterior aplicación en suelos dado que tienen otros elementos nutritivos esenciales para la agricultura (Anexo N°8). Estos elementos nutritivos se pueden clasificar en macro- y microelementos, dependiendo de si las plantas necesitan absorber cantidades relativamente grandes o pequeñas de ellos. Como macroelementos cabe destacar el N, P, K, Ca, Mg y S y como microelementos, elementos traza u oligoelementos esenciales para las plantas se encuentran el Fe, Mn, B, Mo, Cu, Zn, y Cl.

Si se comparan los valores de P con otro fertilizante orgánico como el guano de gallina, que posee un contenido de P total de 1,4% (PINOCHET, 2004) se puede ver que el lodo generado en piscicultura es más rico en P, pero el guano de gallina tiene una concentración más alta de este elemento comparado con el lodo lacustre. El alto contenido de Fósforo de este lodo residual acuícola, le otorgaría un valor como fertilizante orgánico fosforado, coincidiendo con los resultados de Pinochet et al. (2001). La fuente de Nitrógeno y Fósforo en el lodo residual corresponde principalmente al alimento suministrado a los peces en cultivo por la empresa en estudio (Figura N°54 y N°56).

Cabe mencionar que la composición física y química de los lodos residuales está influenciada por una serie de factores, que incluyen el tipo de estanque o ambiente utilizado; especie, edad y tamaño de los peces; alimento y sistemas de alimentación; manejo, método de remoción y tratamiento de los lodos, condiciones y tiempo de almacenamiento de estos. Lo señalado anteriormente coincide con lo señalado por autores como OLSON (1992), AXLER *et*

al., (1997) y NAYLOR *et al.*, (1999). Todos los factores antes mencionados influyen en la gran variabilidad de contenido de nutrientes que presentan los lodos residuales, situación que caracteriza a los residuos orgánicos en general.

Conocer la composición físico - química de los lodos residuales es de gran importancia para decidir sobre el método o proceso con el fin de disminuir el contenido de materia orgánica (estabilización), en especial cuando se trata de la digestión anaerobia. Uno de los factores determinantes corresponde al pH cuyo valor óptimo debe fluctuar entre 6,0 y 7,5. Las muestras de lodos analizadas presentaron un valor de pH cercano a 6,0. Los resultados obtenidos por NÚÑEZ (2000), quien al caracterizar lodos residuales de piscicultura salmónidos encontró que éstos eran ligeramente ácidos (pH = 5,5) por encontrarse en condiciones anaerobias producto de la compactación del lodo en los estanques de piscicultura, coinciden en los valores obtenidos de pH para lodos crudos ya sea de piscicultura flujo abierto como de recirculación. Durante el tratamiento de digestión anaerobia para los lodos residuales en ambas pisciculturas fue necesario ajustar el pH a principio del tratamiento. Estos valores fluctuaron entre 6,0 y 7,5 los cuales coinciden con los valores propuestos por Malina y Pohland, 1992 y Noyola, 1994 como valores óptimos para llevar a cabo el tratamiento de digestión anaerobia.

Valores de pH bajo 6,0 y sobre 7,5 provocan inhibición del proceso anaerobio. Estos resultados se pueden comparar con los obtenidos por Viguera, (2002) durante la digestión anaerobia de una mezcla de lodos secundarios, en donde indica que los valores cercanos a 6,0 favorecen tanto la hidrólisis como la acidogénesis.

Aunque el proceso de digestión anaerobia y el tipo de sustrato ensayado resulta adecuado para disminuir la materia orgánica, se observó que el tiempo de retención hidráulica (HTR) no

fue suficiente para estabilizar totalmente este tipo de residuos, es decir, no se logró reducir en un 38% el contenido de sólidos volátiles, según lo exigido por las normativas de referencia. No obstante, de acuerdo a la concentración de metales y condición higiénica (contenido de patógenos y parásitos) del lodo residual digerido es posible clasificarlo como clase A y no peligroso.

Durante la digestión anaerobia, se observó que las condiciones del proceso fueron óptimas en términos de pH, temperatura y que la presencia de un inóculo contribuye al aumento de la velocidad en la degradación de la materia orgánica. Por otra parte el lodo residual crudo de piscicultura corresponde a un sustrato que no presenta inhibidores para el proceso de digestión anaerobia en condición mesofílica.

La incorporación de un inóculo en el tratamiento de digestión anaerobia en condiciones mesofílicas, acelera el proceso de degradación de la materia orgánica presente en el lodo residual, esto se ve reflejado en los resultados obtenidos tanto para piscicultura de flujo abierto como de recirculación (Figura N°44).

Cabe señalar que el lodo residual estuvo sometido a tratamiento con la presencia de inóculo por un periodo de 56 días, la mitad del periodo para el tratamiento sin inóculo, observándose una mayor reducción de la materia orgánica para la piscicultura de recirculación en el primer caso. Por lo tanto, el rol que cumple el inóculo en el tiempo de retención hidráulica (HTR) es fundamental para acelerar la degradación de la materia orgánica presente en el lodo residual de pisciculturas.

El lodo residual crudo extraído en ambas pisciculturas se encontraba en condición de higienizado, es decir, concentraciones de parásitos y patógenos que están por debajo de la normas anteriormente descritas.

En el caso de haberse detectado una concentración más alta de parásitos de lo que la norma exige, la digestión en condición mesofílica no era un método adecuado para reducir el contenido de estos. El método más apropiado es la digestión anaerobia en condición termofílica, esto es a temperaturas por sobre los 45°C. En estos lodos residuales no fue detectada la presencia de antibióticos situación que favorece la elección de la digestión anaerobia, para estabilizar el lodo.

En relación a la humedad que tiene este tipo de residuo, para efectos de aplicación en suelos es necesario disminuir su porcentaje, esto es básicamente para un adecuado manejo ya que si el lodo residual presenta mucha humedad, podría ser percolado con mayor facilidad, por lo tanto disminuir el efecto positivo en el suelo receptor, ya que las propiedades que posee estos residuos no se aprovecharían lo suficiente en el suelo. Además para la aplicación en suelos es necesario realizar un cálculo de la cantidad de lodo residual previamente estabilizado e higienizado a utilizar para no sobrecargar el terreno, dado que algunos componentes presentes en el lodo residual podrían llegar a ser dañinos para la salud tanto humana como animal.

El Ministerio de Medio Ambiente, tiene en proceso de consulta ciudadana una propuesta denominada: **“REGLAMENTO PARA EL MANEJO DE LODOS GENERADOS EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE PISCICULTURAS”**, que podría ser sancionada en el año 2014.

Se considera que los resultados obtenidos en esta tesis contribuirán a la futura toma de decisiones de la empresa Marine Harvest S.A, en relación al manejo de los lodos residuales en sus pisciculturas para una posterior aplicación en suelos.

CONCLUSION

1. El tipo de piscicultura (de flujo abierto y de recirculación) afecta a las propiedades físico – químicas del lodo residual crudo, a excepción de las propiedades biológicas que no presentan diferencias. Por lo tanto se rechaza la hipótesis planteada respecto a las propiedades físico – químicas, no así para las propiedades biológicas donde se acepta la hipótesis planteada en el presente estudio.
2. Se encuentran diferencias entre piscicultura en los metales Cadmio, Plomo, Selenio y Zinc además en la concentración de Fósforo total presentes en el lodo residual crudo. Cabe señalar que se observa diferencia en los Sólidos totales, esto corresponde básicamente al tipo de manejo que se le aplica en cada piscicultura. Para el Arsénico, Mercurio, Nitrógeno total, Materia orgánica no se observan diferencias.
3. Es posible disminuir el contenido de Materia orgánica y patógenos presente en el lodo residual mediante el tratamiento de digestión anaerobia con y sin inóculo bajo condiciones mesofílicas. Por lo tanto se acepta la hipótesis planteada en el presente estudio.
4. El lodo residual corresponde a un sustrato no peligroso considerando su baja concentración de metales y clase A respecto a su condición higiénica (*salmonella sp.*, coliformes fecales y ovas de helminto) aptas para ser aplicados en suelos.

GLOSARIO

- **Almacenamiento:** El acopio de lodos en un sitio por un lapso determinado. No se considerará almacenamiento el tratamiento de los lodos en canchas de secado.
- **Aplicación de lodos al suelo:** Procedimiento de eliminación mediante la incorporación de lodos al suelo, o mezcla de lodo con suelo, mediante el uso de equipos adecuados.
- **Capacidad de carga:** La capacidad de carga de una especie biológica en un ambiente es el tamaño máximo de población que el ambiente puede soportar indefinidamente en un periodo determinado, teniendo en cuenta el alimento, agua, hábitat, y otros elementos necesarios disponibles en ese ambiente.
- **Digestión anaerobia:** La digestión anaeróbica es el proceso en el cual microorganismos descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno.
- **Disposición final:** Procedimiento de eliminación mediante el depósito definitivo de los residuos, con o sin tratamiento previo y sin generar problemas sanitarios y ambientales.
- **Eliminación:** Última etapa del manejo de los lodos mediante su aplicación al suelo, tratamiento o disposición final.
- **Generador de lodos:** Propietario u operador de planta de tratamiento de aguas servidas que genere lodos.
- **Lodo:** Cualquier residuo semisólido que haya sido generado en plantas de tratamiento de aguas servidas, de residuos industriales líquidos o de agua potable.
- **Lodo crudo:** Es aquel que no ha sido tratado ni estabilizado
- **Lodo digestado:** Lodo crudo que es tratado mediante uno de los métodos de estabilización de lodos.
- **Lodo Clase A:** Lodo sin restricciones sanitarias para aplicación al suelo.

- **Lodo Clase B:** Lodo apto para aplicación al suelo, con restricciones sanitarias de aplicación según tipo y localización de los suelos o cultivos.
- **Lodo crudo:** Lodo proveniente de la etapa de decantación primaria.
- **Lodo estabilizado:** Lodo con reducción del potencial de atracción de vectores sanitarios.
- **Lodo higienizado:** Lodo con reducción de agentes patógenos y parásitos.
- **Macrozona Norte:** Regiones XV de Arica y Parinacota, I de Tarapacá, II de Antofagasta, III de Atacama, IV de Coquimbo, V de Valparaíso, VI del Libertador General Bernardo O'Higgins y Región Metropolitana de Santiago.
- **Macrozona Sur:** Regiones VII del Maule, VIII del Biobío, IX de la Araucanía, XIV de Los Ríos, X de Los Lagos, XI de Aysén y XII de Magallanes y la Antártica Chilena.
- **Manejo sanitario de lodos:** Conjunto de operaciones a las que se somete a los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas luego de su generación, con el objeto de evitar riesgos para la salud de la población y el medio ambiente, incluyendo entre otras su almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final.
- **Metales pesados:** Aquellos sin función biológica conocida y con la capacidad de acumularse en el organismo (Antimonio, Arsénico, Cadmio, Mercurio, Oro, Plata, Plomo, Talio, Uranio y Vanadio)
- **Micronutrientes:** Aquellos requeridos en cantidad traza por plantas y animales para completar su ciclo vital, no obstante por sobre cierto umbral se vuelven tóxicos (Boro, Cobalto, Cobre, Cromo, Manganeseo, Molibdeno, Níquel, Selenio, Zinc)
- **Piscicultura:** Lugar e infraestructura donde se realiza actividades de acuicultura
- **Piscicultura flujo abierto:** Instalación donde si bien hay un tratamiento de agua servida el agua utilizada en el cultivo de organismos no se reutiliza.

- **Piscicultura recirculación:** Conjunto de procesos y componentes que se utilizan para el cultivo de organismos acuáticos, donde el agua es continuamente limpiada y reutilizada.
- **Reutilización o reúso:** recuperación de residuos o de materiales presentes en ellos para ser utilizados en su forma original en procesos productivos o previa transformación como materia prima sustitutiva en el proceso productivo que le dio origen.
- **Relleno sanitario:** Un relleno sanitario es un lugar destinado a la disposición final de desechos o basura, en el cual se pretenden tomar múltiples medidas para reducir los problemas generados por otro método de tratamiento de la basura como son los tiraderos
- **Residuo:** sustancia, elemento u objeto que el generador elimina, se propone eliminar o está obligado a eliminar.
- **Suelo:** Cuerpo natural tridimensional que forma parte de la corteza terrestre y cuyo segmento superior está en contacto con la atmósfera. Constituye el hábitat natural de las raíces de los vegetales y de complejas comunidades bióticas. La productividad del suelo se mide por su capacidad periódica de sintetizar biomasa vegetal.
- **Suelo degradado:** Aquel suelo que por exceso de acidez, niveles de erosión, deterioro de la cubierta vegetal o que por presentar otras limitaciones físicas, químicas o estructurales, no pueden ser utilizados de modo sustentable en la producción agropecuaria.
- **Tratamiento:** todo proceso destinado a cambiar las características físicas y/o químicas de los residuos, peligrosos o no, con el objetivo de neutralizarlos, recuperar energía o materiales o eliminar o disminuir su peligrosidad.
- **Vectores:** Organismos capaces de transportar y transmitir agentes infecciosos, tales como roedores, moscas y mosquitos.

BIBLIOGRAFIA

- **Aguilera, S., G. Borie, P. Peirano, M. Mora, y R. Demanet. 1995.** Caracterización de purines para su potencial uso como fertilizante y mejorador de suelos. *Agric. Téc. (Chile)* 55:251-256
- **Appels, L., Baeyens, J., Degréve, J., Dewil, R., 2008.** Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Prog. Energ. Combust.* 34, 755–781.
- **Buschmann A. H. 2001.** Impacto ambiental de la acuicultura. El estado de la investigación en Chile y el mundo. Terram Publicaciones, Santiago, 63 pp.
- **Campos, A. (2001).** Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria. Tesis Doctoral. Universitat de Lleida
- **Celis, J., Sandoval, M., Zagal, E., Briones, M. 2006.** Efecto de la adición de biosólidos urbanos y de salmonicultura sobre la germinación de semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en un suelo Patagónico. *Rev. Ciencia Suelo Nutr. Veg.* 6 (3): 13-25.
- **Clark, R., & Speece, R. (1989).** The pH tolerance of anaerobic digestion. *Advanced water pollution research. Int. Conf. 5th*, (págs. 1-27).
- **Council of the European Communities. 1986.** Council Directive on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture 86/278/EEC. *Official Journal of the European Communities*, 4.7.86. N° L181 p. 6-12.
- **Decreto Supremo 004/2009,** Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas República de Chile, Ministerio Secretaría General de la presidencia de la República.

- **Díaz-Báez, M.; Espitia, S. y Molina, F. (2002)** Digestión Anaerobia una Aproximación a la Tecnología. UNIBIBLIOS. Bogotá, Colombia
- **Fannin. (1987).** Start-up, operation, stability, and control. En D. Chynoweth, & R. Isaacson, Anaerobic digestion of biomass. Elsevier applied science LTD.
- **Follett, R. F. and Stewart, B. A. (Editor), 1985.** Soil Erosion and Crop Productivity. Soil Science Society of America, Inc., Madison, 503 pp.
- **Gooley, G.J. y F.M. Gavine. 2003.** Integrated AgriAquaculture Systems. RIRDC Project No. MFR-2A. 189 Pp
- **Hill, D., & Holmberg, R. (1988).** Long chain volatile fatty acid relationship in anaerobic digestion of swine waste. Biological wastes. Vol. 23, 195-214.
- **Hill, D., Cobb, S., & Bolte, J. (1987).** Using Volatile fatty acid relationships to predict anaerobic digester failure. Transactions of the ASAE. Vol. 30, 496-501.
- **Lay, J.J., Li, Y.Y., Noike, T. (1997).** Influences of pH and moisture content on the methane production in highsolids sludge digestion. Water Research, 31 (10), 1518-1524.
- **Marquez, F. (2005).** Estudio del tratamiento de lodos provenientes de pisciculturas mediante un sistema de digestión anaerobio. Chile: Universidad Católica de Temuco.
- **Mazzarino, M.J., I. Walter, G. Costa, F. Laos, L. Roselli, and P. Satti. 1997.** Plant response to fish farming wastes in volcanic soils. J. Environ. Qual. 26:522-528.
- **Metcalf ad Eddy. (2003).** Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (4ta Edición). McGraw Hill.
- **Noone, G. (1990).** The treatment of domestic wastes. Critical reports on applied chemistry. Vol 31, 139-170.

- **Núñez, M. 2000.** Caracterización, Clasificación y Tratamiento de Fangos Residuales de Piscicultura Salmonidea para su Biodisponibilidad como Bioremediador y Fertilizante Orgánico. Tesis Lic. Acuic. Santiago. Universidad Nacional Andrés Bello. Facultad de Ecoligía y Recursos Naturales. 170 p.
- **Romero, Jairo. 2002.** Tratamiento de Aguas Residuales (Colombia) 200 p.
- **Salazar, F., and R. Saldaña. 2007.** Characterization of manures from fish cage farming in Chile. *Bioresour. Technol.* 98: 3322-3327.
- **Salazar, F., Alfaro, M, Teuber, N. y Saldaña, R. (2005).** Uso de lodos de la industria salmonera en suelos agrícolas. *Rev. Tierra Adentro;* 60, Enero-Febrero, 53p.
- **Six, J., Elliott E.T., Paustian P., 2000.** Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.*, 32, 2099-2103.
- **Teuber, N., M.A. Alfaro, F.J. Salazar, and C. Bustos. 2005.** Sea salmon sludge as fertilizer: effects on a volcanic soil and annual ryegrass yield and quality. *Soil Use Managem.* 21:432-434.
- **Yossa, M., Hernández, G., Ortega, J. y Vásquez, W. (2009).** Ensayo preliminar sobre granulometría en estanques piscícolas. *Memorias xv Jornada de Acuicultura, Universidad de Los Llanos, Instituto de Acuicultura de Los Llanos* iall, 78 -81

LINKOGRAFIA

- Instituto de Investigaciones Agropecuarias, <http://www.inia.cl/>
- Instituto Tecnológico del Salmón S.A., <http://www.intesal.cl/>
- Ministerio del Medio Ambiente, <http://www.mma.gob.cl/1304/w3-channel.html>
- Servicio Nacional de Pesca, <http://www.sernapesca.cl/>
- SalmonChile, <http://www.salmonchile.cl/frontend/index.asp>

ANEXOS

ANEXO N°1:
EXTRACCION DE LODOS RESIDUALES CRUDOS

1. Piscicultura de flujo abierto

Materiales

- **Digestor**
- **Quecha de piscina**
- **Balde 50 litros**

Metodología:

Para la extracción del lodo residual crudo en piscicultura de flujo abierto es necesario extraerlo del estanque de decantación con la ayuda de una quecha de piscina. Esta quecha se sumerge en el estanque y cuidadosamente se levanta para extraer el lodo. Luego es puesto en un balde de 50 litros de capacidad. Posteriormente se trasvasija al digestor de acero inoxidable y se cierra quedando en condición anaerobia desde ese momento. Para las muestras que son enviadas a laboratorios se realiza la misma actividad solo que son llenados diferentes envases que abastecen los laboratorios.



Figura N° 45: Extracción del lodo residual crudo en piscicultura de flujo abierto.

2. Piscicultura de recirculación

Materiales

- **Digestor**
- **Balde 50 litros**

Metodología:

Para la extracción de lodo residual crudo en piscicultura de recirculación se realiza bajo los conos de decantación, se abre una válvula que permite que el lodo acumulado en estos decantadores caiga por gravedad y se dispone en los digestores de acero inoxidable. Una vez que se determina el volumen de llenado se cierra cuidadosamente para quedar en condición anaerobia desde ese momento. Para la extracción de muestras de lodo crudo para los laboratorios se extrae de la misma manera para llenar el digestor, solo que ahora se utiliza un balde de 50 litros de capacidad para llenar diferentes envases que los laboratorios abastecen.



Figura N° 46: Extracción del lodo residual crudo en piscicultura de recirculación.

ANEXO N°2:

TOMA DE MUESTRAS DE LODOS EN DIGESTORES ANAEROBIOS

Materiales

- **Bomba vacío**
- **Matraz enlermayer**
- **Tubería o manguera flexible**
- **Cápsula cerámica**

Metodología:

Se introduce en la apertura del digestor previamente homogenizado la tubería flexible ya conectada al matraz, que tiene la función de crear una cámara de vacío. Se enciende la bomba de vacío y luego de generar el vacío en el matraz la columna de lodo en la tubería se eleva hasta almacenarse en el matraz.

Aproximadamente se extrae 100 gramos de lodo para cada digestor.



Figura N° 47: Extracción de lodo residual del digestor anaerobio.

ANEXO N°3:
ACTIVACION DEL PRODUCTO BIOWISH

Materiales

- **Agitador magnético con transferencia de calor**
- **Matraz 1000 ml**
- **Agua esterilizada**
- **Algodón**
- **Balanza**
- **Biowish (Producto comercial)**

Metodología:

Disolver 100 gramos de Biowish en 500 cc de agua esterilizada puesta en un matraz, luego se tapa con un tapón de algodón con el fin de que la solución pueda respirar. Se activa el producto por 16 horas con agitación constante y a temperaturas entre los 20 a 40°C.

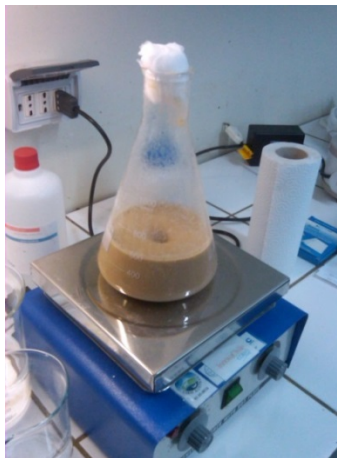


Figura N° 48: Activación de Biowish.

ANEXO N°4:
DETERMINACION DE SOLIDOS VOLATILES

Materiales

- **Estufa**
- **Mufla**
- **Capsula cerámica**
- **Balanza digital**

Metodología:

Con el lodo ya extraído de los digestores y trasvasiado en cápsulas de cerámica se procede a masar 30 gramos aproximadamente. Luego estas cápsulas con el peso del lodo ya conocido se introduce en estufa a 105 °C por un periodo de 24 horas.

La finalidad de este secado es conocer la humedad que tiene la muestra.



Figura N° 49: Determinación de sólidos volátiles.

ANEXO N°5:
DETERMINACION DE CONCENTRACION DE ACIDOS

Materiales

- **Probeta**
- **Embudo**
- **Pipeta**
- **Agua destilada**
- **Papel filtro**
- **Solución NaOH 0,5 M**
- **Fenolftaleína**
- **Bureta**
- **Vaso precipitado**
- **Piseta**

Metodología:

Se extrae lodo del digestor aproximadamente 30 gramos, luego se procede a filtrar el lodo a través de un papel filtro ayudado con agua destilada con el fin de que escurra más fácilmente. Posterior a esta actividad se pipetea 10 ml del lodo ya filtro solo de la parte superior donde ya está libre de material particulado. Luego se trasvasija a un matraz y se le agrega unas gotas de fenolftaleína y 5 ml de agua destilada para clarificar la solución. Mediante titulación utilizando NaOH por goteo a través de la bureta se procede a verificar hasta que la solución cambie totalmente de color.



Figura N° 50: Filtrado del lodo crudo.



Figura N° 51: Lodo filtrado con agua destilada.

ANEXO N°6:
ANALISIS DE ALIMENTO

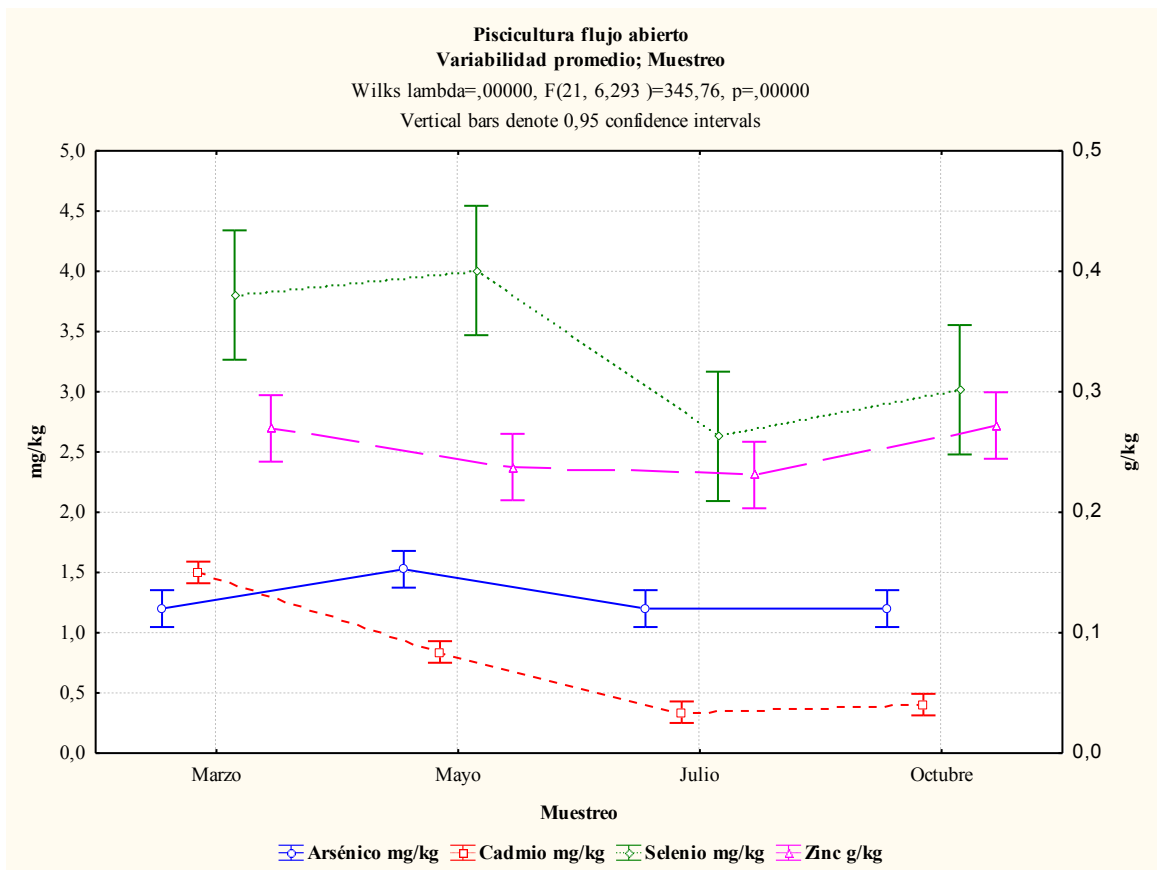


Figura N° 52: Variación promedio (n=3) de metales presentes en el alimento suministrado en piscicultura de flujo abierto.

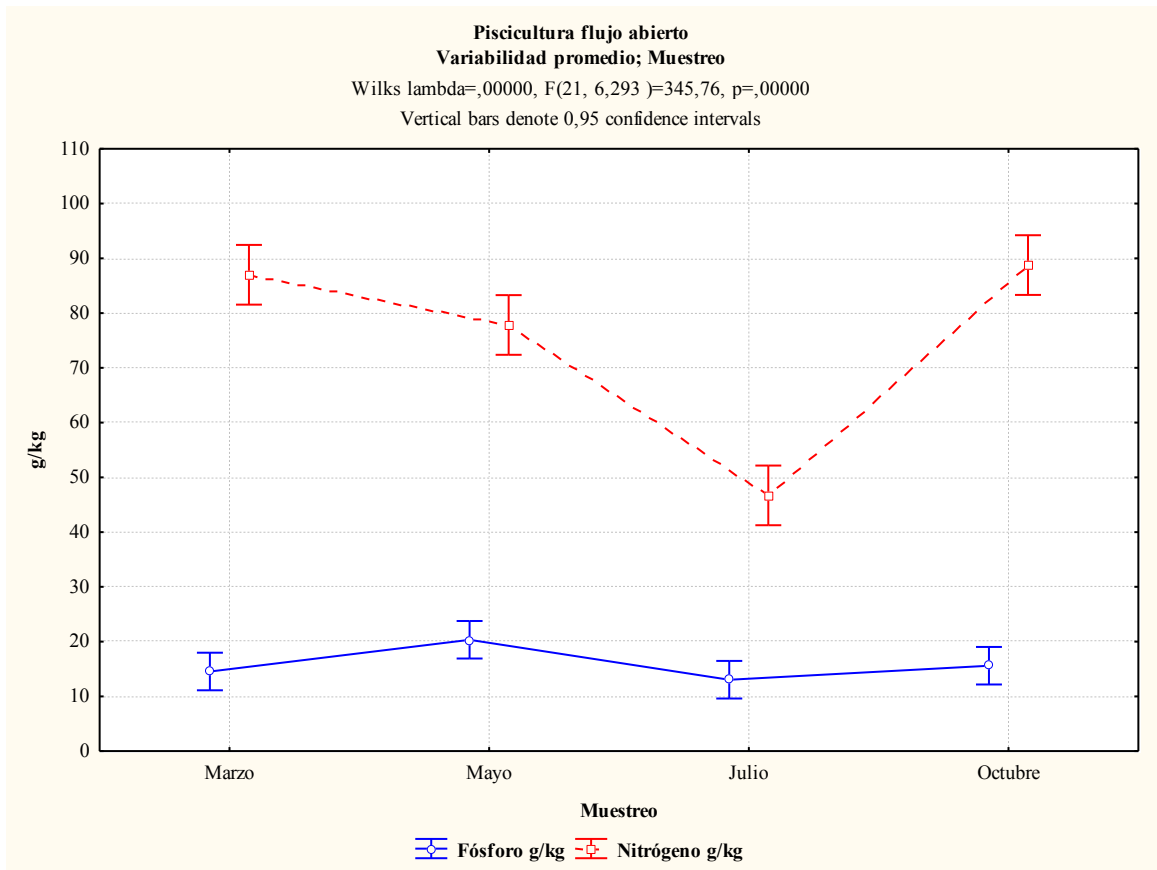


Figura N° 53: Variación promedio (n=3) de Fósforo total y Nitrógeno total presentes en alimento suministrado en piscicultura de flujo abierto.

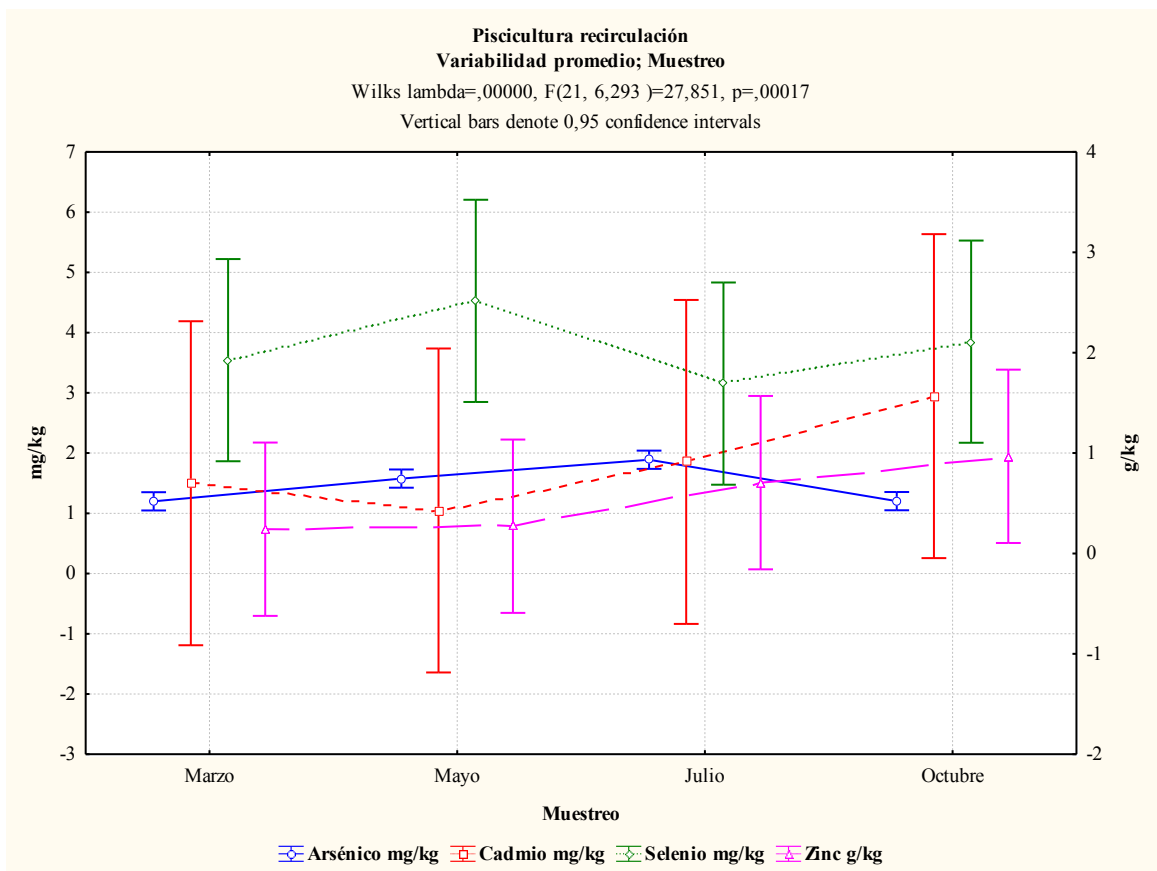


Figura N° 54: Variación promedio (n=3) de metales presentes en alimento suministrado en piscicultura de recirculación.

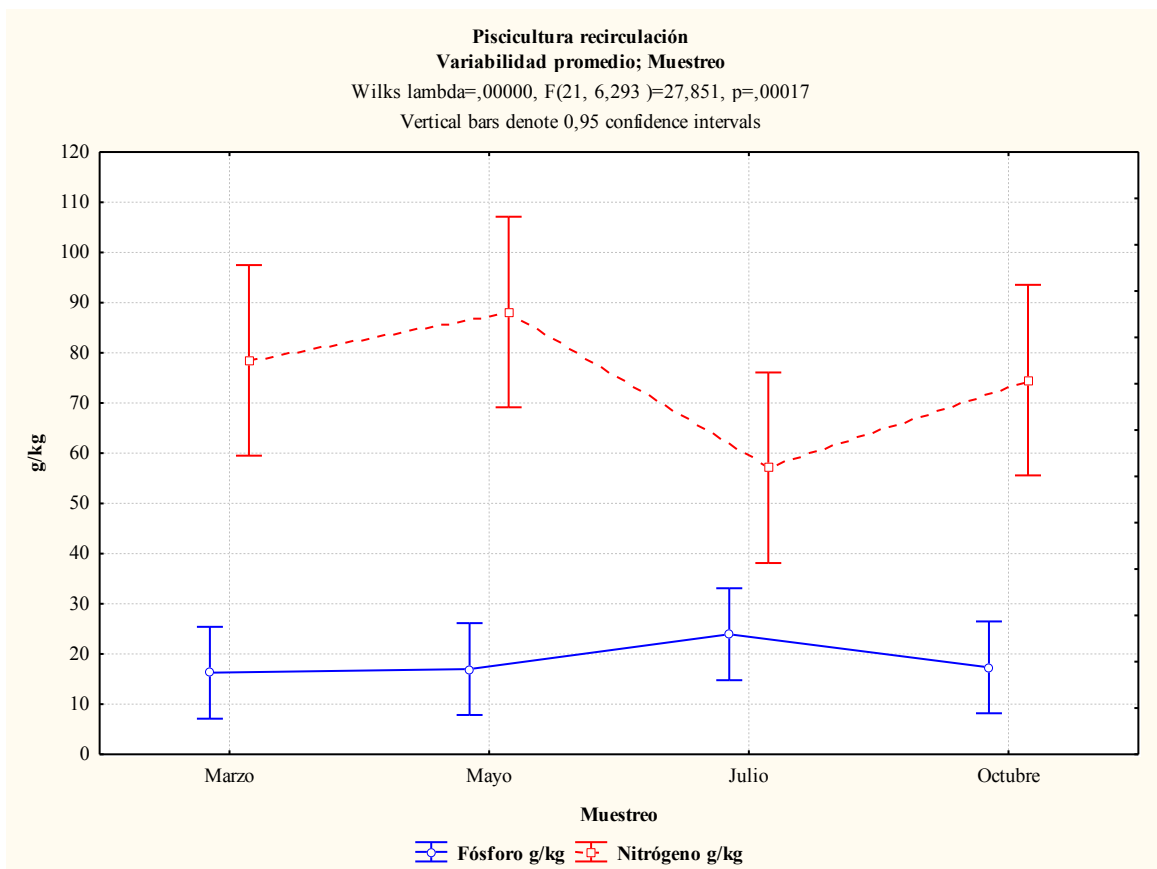


Figura N° 55: Variación promedio (n=3) de Fósforo total y Nitrógeno total presentes en el alimento suministrado en piscicultura de recirculación.

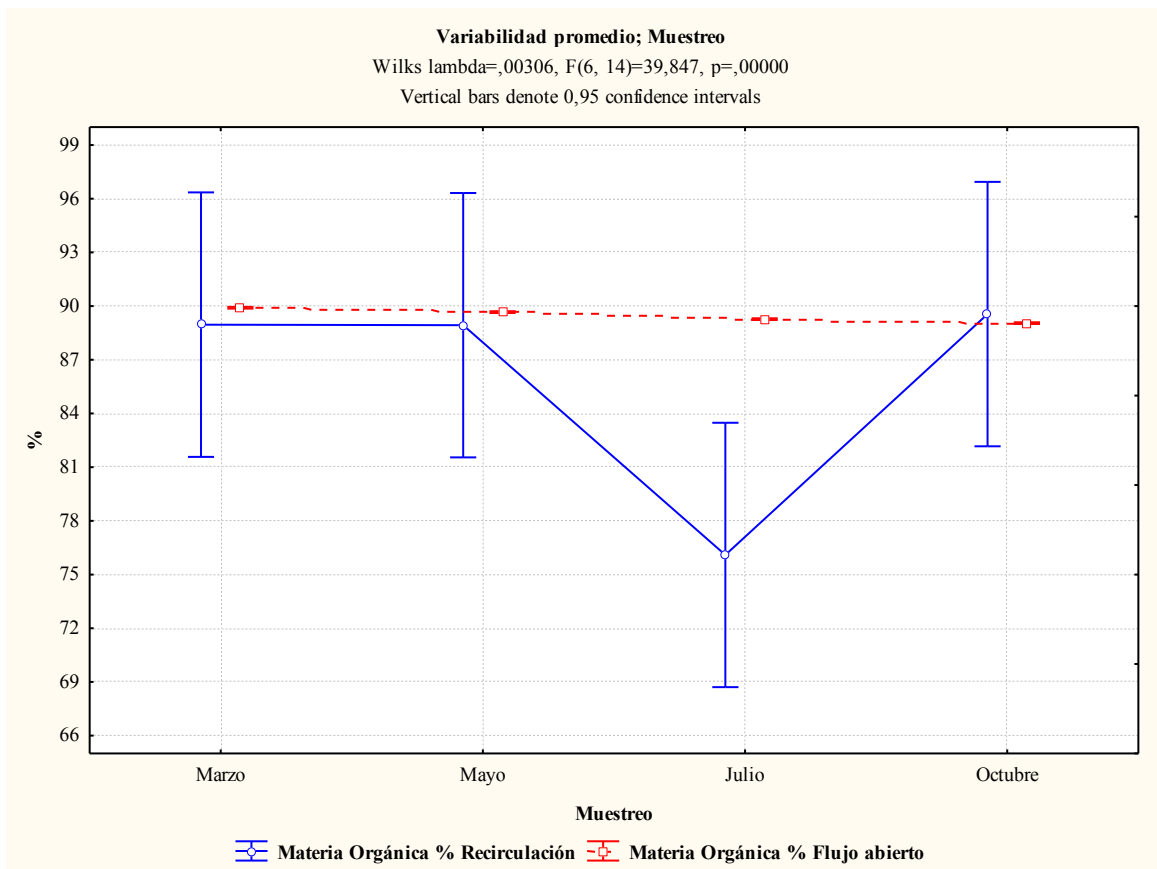


Figura N° 56: Variación promedio (n=3) de la Materia orgánica presentes en el alimento suministrado en piscicultura de flujo abierto y de recirculación

ANEXO N°7:
OTRAS PROPIEDADES EN LODOS RESIDUALES DE PISCICULTURAS

Tabla N° 28: Propiedades del lodo residual crudo (mg/kg base seca) en piscicultura de flujo abierto y de recirculación.

Componente	Piscicultura	
	Flujo abierto	Recirculación
K	161	262
Ca	7710	14560
Mg	512	853
Na	461	1160
Fe	485	849
Mn	24	79
Cu	27	32
S	1770	2444
B	690	1020
Al	620	990

ANEXO N°8:
**CONCENTRACIONES MAXIMAS DE METALES EN LODOS PARA APLICACIÓN AL
SUELO (DS04/09)**

Tabla N° 29: Concentración máxima (mg/kg base seca) de metales en lodos para aplicación al suelo.

Metal	Suelos que cumplen los requisitos	Suelos degradados que cumplen los requisitos
Arsénico	20	40
Cadmio*	8	40
Cobre	1000	1200
Mercurio*	10	20
Níquel	80	420
Plomo*	300	400
Selenio*	50	100
Zinc	2000	2800

*Cuando las concentraciones totales de:

Cadmio	20
Mercurio	4
Plomo	100
Selenio	20

ANEXO N°9:
CONCENTRACIONES MAXIMAS DE METALES EN SUELO RECEPTOR (DS04/09)

Tabla N° 30: Concentración máxima (mg/kg base seca) de metales en suelo receptor.

Metal	Macrozona Norte		Macrozona Sur
	pH > 6,5	pH ≤ 6,5	pH > 5,0
Arsénico	20	12,5	10
Cadmio	2	1,25	2
Cobre	150	100	75
Mercurio	1,5	1	1
Níquel	112	50	30
Plomo	75	50	50
Selenio	4	3	4
Zinc	175	120	175