

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

## **ESCUELA DE POSGRADO**



**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS**

**TESIS:**

**REMOCIÓN DE HUEVOS DE HELMINTOS, *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes* DE LOS LODOS RESIDUALES CON ÓXIDO DE CALCIO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CELENDÍN.**

Para optar el Grado Académico de

**DOCTOR EN CIENCIAS**

**MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES**

Presentada por:

**M.Cs. EFRAÍN HUMBERTO QUINTANILLA CASTRO**

Asesor:

**Dr. GLICERIO EDUARDO TORRES CARRANZA**

Cajamarca, Perú

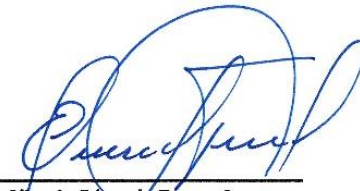
2025

## **CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD**

1. Investigador:  
Efraín Humberto Quintanilla Castro  
DNI: 41613208  
Escuela Profesional/Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias. Programa de Doctorado en Ciencias, Mención: Gestión Ambiental y Recursos Naturales.
2. Asesor: Dr. Glicerio Eduardo Torres Carranza
3. Grado académico o título profesional  
☐ Bachiller      ☐ Título profesional      ☐ Segunda especialidad  
☐ Maestro      ☒ Doctor
4. Tipo de Investigación:  
☒ Tesis      ☐ Trabajo de investigación      ☐ Trabajo de suficiencia profesional  
☐ Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:  
REMOCIÓN DE HUEVOS DE HELMINTOS, *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes* DE LOS LODOS RESIDUALES CON ÓXIDO DE CALCIO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CELENDÍN.
6. Fecha de evaluación: **15/10/2025**
7. Software antiplagio:      ☒ TURNITIN      ☐ URKUND (ORIGINAL) (\*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: **20 %**
9. Código Documento: **3117:513162880**
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:  
☒ **APROBADO**      ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: **17/10/2025**

*Firma y/o Sello  
Emisor Constancia*



**Dr. Glicerio Eduardo Torres Carranza**  
DNI: 26602048

\* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023

COPYRIGHT © 2025 by  
**EFRAÍN HUMBERTO QUINTANILLA CASTRO**  
Todos los derechos reservados



**Universidad Nacional de Cajamarca**  
LICENCIADA CON RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO Nº 080-2018-SUNEDU/CD  
**Escuela de Posgrado**  
CAJAMARCA - PERU



**PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS**

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

**MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES**

Siendo las 16:00 horas, del día 11 de setiembre del año dos mil veinticinco, reunidos en el Auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Jurado Evaluador presidido por la, **Dra. CONSUELO BELANIA PLASENCIA ALVARADO** Dr. **EDIN EDGARDO ALVA PLASENCIA**, Dr. **JIMY FRANK OBLITAS CRUZ** y en calidad de Asesor Dr. **GLICERIO EDUARDO TORRES CARRANZA**, actuando de conformidad con el Reglamento Interno de la Escuela de Posgrado y el Reglamento del Programa de Doctorado de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se inició la SUSTENTACIÓN de la tesis titulada: **REMOCIÓN DE HUEVOS DE HELMINTOS, *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes* DE LOS LODOS RESIDUALES CON ÓXIDO DE CALCIO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CELENDÍN**, presentada por el Maestro en Ciencias Mención: Gestión Ambiental, **EFRAIN HUMBERTO QUINTANILLA CASTRO**.

Realizada la exposición de la Tesis y absueltas las preguntas formuladas por el Jurado Evaluador, y luego de la deliberación, se acordó APROBAR con la calificación de DIECISIETE (17) la mencionada Tesis; en tal virtud, el Maestro en Ciencias Mención: Gestión Ambiental **EFRAIN HUMBERTO QUINTANILLA CASTRO**, está apto para recibir en ceremonia especial el Diploma que lo acredita como **DOCTOR EN CIENCIAS**, Mención **GESTIÓN AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES** de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias.

Siendo las 17:30 horas del mismo día, se dio por concluido el acto.

  
.....  
**Dr. Glicerio Eduardo Torres Carranza**  
Asesor

  
.....  
**Dra. Consuelo Belania Plasencia Alvarado**  
Jurado Evaluador

  
.....  
**Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia**  
Jurado Evaluador

  
.....  
**Dr. Jimmy Frank Oblitas Cruz**  
Jurado Evaluador

## **Dedicatoria**

A mis hijos, padres, hermanos, familia

y allegados por su apoyo constante...

## **Agradecimiento**

A mis padres Efraín y Aurora, mis hermanos Katia y Arturo; por su soporte y fuerza permanentes.

A Fabricio Sebastián, Efraín Andrés, Elia Ximena y toda mi familia; por el amor, apoyo, confianza y fortaleza hacia mi persona.

Al Doctor Glicerio Eduardo Torres Carranza; por todo el apoyo, confianza y soporte necesarios para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A mi Universidad Nacional de Cajamarca - Unidad de Posgrado, Docentes, Compañeros, Personal Administrativo y Servicios.

A Roxana Poitiers Mantilla Huaripata por su consideración y apoyo interminables.

A la Ingeniera Mariela Alexandra Villar Araujo ∞, por su ayuda incondicional, soporte, colaboración y consejos constructivos.

Al Licenciado Segundo Guevara Camacho, por su disponibilidad y soporte en el área de análisis de laboratorio.

A los profesionales y personal encargado de la PTAR Celendín por los conocimientos impartidos y su colaboración permanente.

## CONTENIDO

|                                                                                                                         |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÍNDICE DE TABLAS .....                                                                                                  | xii   |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                                                                                                  | xiii  |
| ABREVIATURAS.....                                                                                                       | xvi   |
| RESUMEN .....                                                                                                           | xvii  |
| ABSTRACT.....                                                                                                           | xviii |
| CAPÍTULO I .....                                                                                                        | 1     |
| INTRODUCCIÓN .....                                                                                                      | 1     |
| CAPÍTULO II .....                                                                                                       | 4     |
| MARCO TEÓRICO.....                                                                                                      | 4     |
| 2.1. Antecedentes de la investigación .....                                                                             | 4     |
| 2.2. Bases teóricas .....                                                                                               | 14    |
| 2.2.1. Agua residual doméstica .....                                                                                    | 14    |
| 2.2.2. Lodo primario .....                                                                                              | 14    |
| 2.2.3. Lodo secundario .....                                                                                            | 15    |
| 2.2.4. Lodo residual .....                                                                                              | 15    |
| 2.2.5. Lodo residual deshidratado.....                                                                                  | 15    |
| 2.2.6. Lodos de aguas residuales domésticas .....                                                                       | 15    |
| 2.2.7. Características químicas de los lodos .....                                                                      | 16    |
| 2.2.8. Macronutrientes .....                                                                                            | 16    |
| 2.2.9. Micronutrientes .....                                                                                            | 16    |
| 2.2.10. Materia orgánica.....                                                                                           | 17    |
| 2.2.11. Caracterización de los lodos residuales de PTAR en Perú.....                                                    | 17    |
| 2.2.11.1. Lodo residual deshidratado de Clase A: Son aquellos aplicables al suelo sin<br>restricciones sanitarias. .... | 19    |

|            |                                                                                                                                                                 |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.11.2.  | Lodo residual deshidratado de Clase B: Son aquellos aplicables al suelo con restricciones sanitarias según localización de los suelos y/o tipo de cultivo. .... | 19 |
| 2.2.12.    | <i>Huevos de helmintos</i> .....                                                                                                                                | 19 |
| 2.2.12.1.  | Huevos viables de helmintos (HVH). ....                                                                                                                         | 19 |
| 2.2.12.2.  | Aspectos microbiológicos generales. ....                                                                                                                        | 19 |
| 2.2.12.3.  | Estructura y composición del huevo - anatomía y capas. ....                                                                                                     | 20 |
| 2.2.12.4.  | Embriogénesis, eclosión y factores que inducen la eclosión. ....                                                                                                | 21 |
| 2.2.12.5.  | Resistencia ambiental y persistencia (estabilidad e infectividad). ....                                                                                         | 22 |
| 2.2.12.6.  | Interacción inmunológica y efectos patogénicos asociados al huevo. ....                                                                                         | 22 |
| 2.2.12.7.  | Viabilidad, ensayos de infectividad y marcadores de viabilidad. ....                                                                                            | 23 |
| 2.2.12.8.  | Inactivación y tratamiento (aguas residuales, lodos, seguridad alimentaria). ....                                                                               | 23 |
| 2.2.12.9.  | Importancia microbiológica. ....                                                                                                                                | 23 |
| 2.2.12.10. | Importancia sanitaria y criterios de seguridad (resumen). ....                                                                                                  | 24 |
| 2.2.13.    | <i>Escherichia coli</i> .....                                                                                                                                   | 24 |
| 2.2.13.1.  | Clasificación Taxonómica. ....                                                                                                                                  | 24 |
| 2.2.13.2.  | Características Morfológicas y Fisiológicas. ....                                                                                                               | 24 |
| 2.2.13.3.  | Genética y Factores de Virulencia .....                                                                                                                         | 25 |
| 2.2.13.4.  | Resistencia Antimicrobiana. ....                                                                                                                                | 25 |
| 2.2.13.5.  | Relevancia Microbiológica. ....                                                                                                                                 | 25 |
| 2.2.14.    | <i>Enterobacter aerogenes</i> . ....                                                                                                                            | 25 |
| 2.2.14.1.  | Clasificación Taxonómica. ....                                                                                                                                  | 26 |

|                      |                                                                                                         |    |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.14.2.            | Características Morfológicas y Fisiológicas. ....                                                       | 26 |
| 2.2.14.3.            | Genética y Factores de Virulencia. ....                                                                 | 26 |
| 2.2.14.4.            | Resistencia Antimicrobiana. ....                                                                        | 26 |
| 2.2.14.5.            | Relevancia Microbiológica. ....                                                                         | 27 |
| 2.2.15.              | <i>Óxido de calcio (CaO)</i> . ....                                                                     | 27 |
| 2.2.14.6.            | Granulometría del óxido de calcio (CaO). ....                                                           | 27 |
| 2.2.14.7.            | Características fisicoquímicas del óxido de calcio (CaO). ....                                          | 27 |
| 2.2.16.              | <i>Decreto Supremo N°015-2017-MVCS</i> . ....                                                           | 28 |
| 2.2.17.              | <i>Alternativas de uso de los lodos residuales provenientes de aguas residuales domésticas</i><br>..... | 29 |
| 2.3.                 | Definición de términos básicos. ....                                                                    | 30 |
| 2.3.1.               | <i>Huevos de helmintos</i> ....                                                                         | 30 |
| 2.3.2.               | <i>Escherichia coli</i> ....                                                                            | 30 |
| 2.3.3.               | <i>Enterobacter aerogenes</i> . ....                                                                    | 30 |
| 2.3.4.               | <i>Óxido de calcio</i> ....                                                                             | 30 |
| 2.3.5.               | <i>pH</i> ....                                                                                          | 31 |
| 2.3.6.               | <i>Temperatura</i> ....                                                                                 | 31 |
| 2.3.7.               | <i>Remoción</i> ....                                                                                    | 31 |
| CAPÍTULO III.        | .....                                                                                                   | 32 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | .....                                                                                                   | 32 |
| 3.1.                 | Localización del estudio ....                                                                           | 32 |
| 3.2.                 | Descripción de la metodología. ....                                                                     | 33 |
| 3.2.1.               | <i>Identificación del punto de monitoreo</i> . ....                                                     | 34 |
| 3.2.2.               | <i>Muestreo del lodo residual deshidratado</i> ....                                                     | 35 |

|                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.3. Acondicionamiento de las muestras de lodo residual deshidratado .....                                                           | 36  |
| 3.2.4. Medición de parámetros de pH y temperatura.....                                                                                 | 38  |
| 3.2.5. Análisis microbiológico .....                                                                                                   | 39  |
| 3.2.5.1. Procesamiento de la muestra para <i>Escherichia coli</i> y <i>Enterobacter aerogenes</i> .....                                | 39  |
| 3.2.5.2. Procesamiento de la muestra para huevos viables de helmintos. ....                                                            | 41  |
| 3.2.6. Presentación de los resultados .....                                                                                            | 45  |
| CAPÍTULO IV .....                                                                                                                      | 46  |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                                                                                                           | 46  |
| 4.1. Análisis microbiológico .....                                                                                                     | 46  |
| 4.1.1. Resultados de huevos de helmintos .....                                                                                         | 46  |
| 4.1.2. Resultados de <i>Escherichia coli</i> .....                                                                                     | 60  |
| 4.1.3. Resultados de <i>Enterobacter aerogenes</i> .....                                                                               | 72  |
| 4.1.4. Correlación entre los parámetros analizados: huevos de helmintos, <i>Escherichia coli</i> y <i>Enterobacter aerogenes</i> ..... | 84  |
| 4.2. Análisis físico-químico .....                                                                                                     | 90  |
| 4.2.1. Resultados del pH.....                                                                                                          | 90  |
| 4.2.2. Resultados de la temperatura .....                                                                                              | 95  |
| CAPÍTULO V .....                                                                                                                       | 100 |
| CONCLUSIONES .....                                                                                                                     | 100 |
| CAPÍTULO VI: .....                                                                                                                     | 102 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                                                                                        | 102 |
| CAPÍTULO VI.....                                                                                                                       | 112 |
| APÉNDICES.....                                                                                                                         | 112 |
| 6.1. Trabajo de campo y laboratorio .....                                                                                              | 112 |
| Anexo B. Fotografías de laboratorio: equipamiento y análisis.....                                                                      | 115 |

|                                                                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CAPÍTULO VII .....                                                                                                                                                                          | 125 |
| ANEXOS .....                                                                                                                                                                                | 125 |
| 7.1. Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales DECRETO SUPREMO N° 015-2017-VIVIENDA..... | 125 |
| 7.2. Informes de análisis microbiológico.....                                                                                                                                               | 134 |
| 7.2.1. Primer informe de laboratorio – 09 febrero 2024 .....                                                                                                                                | 134 |
| 7.2.2. Segundo informe de laboratorio – 21 febrero 2024.....                                                                                                                                | 137 |
| 7.2.3. Tercer informe de laboratorio – 06 marzo 2024.....                                                                                                                                   | 140 |
| 7.2.4. Cuarto informe de laboratorio – 20 marzo 2024 .....                                                                                                                                  | 143 |
| 7.2.5. Quinto informe de laboratorio – 04 abril 2024.....                                                                                                                                   | 146 |
| 7.2.6. Sexto informe de laboratorio – 17 abril 2024 .....                                                                                                                                   | 149 |
| 7.2.7. Séptimo informe de laboratorio – 03 mayo 2024 .....                                                                                                                                  | 152 |
| 7.2.8. Octavo informe de laboratorio – 21 mayo 2024 .....                                                                                                                                   | 155 |
| 7.2.9. Noveno informe de laboratorio – 05 junio 2024 .....                                                                                                                                  | 158 |
| 7.2.10. Décimo informe de laboratorio – 20 junio 2024.....                                                                                                                                  | 161 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1</b> Composición y características de los lodos residuales. ....                                                                                                                     | 18 |
| <b>Tabla 2</b> Taxonomía de <i>Escherichia coli</i> . ....                                                                                                                                     | 24 |
| <b>Tabla 3</b> Taxonomía de <i>Enterobacter aerogenes</i> . ....                                                                                                                               | 26 |
| <b>Tabla 4</b> Categorías y alternativas de uso del lodo residual PTAR. ....                                                                                                                   | 29 |
| <b>Tabla 5</b> Detalle de tratamientos aplicados. ....                                                                                                                                         | 37 |
| <b>Tabla 6</b> Métodos y límites para parámetros estudiados. ....                                                                                                                              | 44 |
| <b>Tabla 7</b> Huevos viables de helmintos (HVH/4 g de lodo residual deshidratado). ....                                                                                                       | 49 |
| <b>Tabla 8</b> ANOVA para el número de huevos viables de helmintos. ....                                                                                                                       | 54 |
| <b>Tabla 9</b> Tukey para el número de huevos viables de helmintos. ....                                                                                                                       | 57 |
| <b>Tabla 10</b> Número más probable (NMP) de <i>Escherichia coli</i> . ....                                                                                                                    | 63 |
| <b>Tabla 11</b> ANOVA para número más probable (NMP) de <i>Escherichia coli</i> . ....                                                                                                         | 67 |
| <b>Tabla 12</b> Tukey para número más probable (NMP) de <i>Escherichia coli</i> . ....                                                                                                         | 70 |
| <b>Tabla 13</b> Número más probable (NMP) de <i>Enterobacter aerogenes</i> . ....                                                                                                              | 75 |
| <b>Tabla 14</b> ANOVA para número más probable (NMP) de <i>Enterobacter aerogenes</i> . ....                                                                                                   | 79 |
| <b>Tabla 15</b> Tukey para número más probable (NMP) de <i>Enterobacter aerogenes</i> . ....                                                                                                   | 82 |
| <b>Tabla 16</b> Promedio del N° de Huevos Viables de Helmintos (HVH), Número Más Probable (NMP) de <i>Escherichia coli</i> y Número Más Probable (NMP) de <i>Enterobacter aerogenes</i> . .... | 85 |
| <b>Tabla 17</b> Valores del pH al primer y quinto día de aplicación de óxido de calcio. ....                                                                                                   | 91 |
| <b>Tabla 18</b> Valores de temperatura (°C) al primer y quinto día de aplicación de óxido de calcio. ....                                                                                      | 96 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 1</b> Ubicación de la Planta de Tratamiento de Agua Residual ciudad de Celendín .....                        | 33  |
| <b>Figura 2</b> Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de Celendín .....  | 34  |
| <b>Figura 3</b> Lecho de secados en la Planta de Tratamiento de Agua Residual Celendín.....                            | 35  |
| <b>Figura 4</b> Muestreo del lodo residual .....                                                                       | 36  |
| <b>Figura 5</b> Distribución de los tratamientos para lodo residual .....                                              | 37  |
| <b>Figura 6</b> Medición de pH y temperatura del lodo residual .....                                                   | 38  |
| <b>Figura 7</b> Contenedores para análisis microbiológico.....                                                         | 42  |
| <b>Figura 8</b> Análisis para huevos de helmintos .....                                                                | 42  |
| <b>Figura 9</b> Análisis para Escherichia coli y Enterobacter aerogenes .....                                          | 45  |
| <b>Figura 10</b> Promedio del número de huevos viables de helmintos (HVH/4 g de lodo residual). .                      | 50  |
| <b>Figura 11</b> Promedio de número más probable (NMP) de Escherichia coli. ....                                       | 64  |
| <b>Figura 12</b> Promedio de número más probable (NMP) de Enterobacter aerogenes. ....                                 | 76  |
| <b>Figura 13</b> Promedio de los valores del pH al primer y quinto día de aplicación de óxido de calcio. ....          | 92  |
| <b>Figura 14</b> Promedio de valores de temperatura (°C) al primer y quinto día de aplicación de óxido de calcio ..... | 97  |
| <b>Figura 15</b> PTAR Celendín – RAFA.....                                                                             | 112 |
| <b>Figura 16</b> Lecho de secados PTAR Celendín. ....                                                                  | 113 |
| <b>Figura 17</b> Selección del lodo residual deshidratado en el lecho de secados PTAR Celendín. ..                     | 113 |
| <b>Figura 18</b> Preparación y aplicación de los tratamientos con óxido de calcio. ....                                | 114 |
| <b>Figura 19</b> Muestras del lodo residual deshidratado con óxido de calcio. ....                                     | 114 |

|                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 20</b> Lectura de parámetros: pH y temperatura. ....                                                                | 115 |
| <b>Figura 21</b> Equipo autoclave digital para procedimientos de esterilización. ....                                         | 115 |
| <b>Figura 22</b> Balanza de precisión para pesado de muestras.....                                                            | 116 |
| <b>Figura 23</b> Incubadora microbiológica 74 Litros. ....                                                                    | 116 |
| <b>Figura 24</b> Microscopio óptico trilocular. ....                                                                          | 117 |
| <b>Figura 25</b> Preparación de material estéril para análisis. ....                                                          | 117 |
| <b>Figura 26</b> Esterilización de material mediante autoclave. ....                                                          | 118 |
| <b>Figura 27</b> Codificación de las muestras. ....                                                                           | 118 |
| <b>Figura 28</b> Pesado de muestra para dilución inicial. ....                                                                | 119 |
| <b>Figura 29</b> Dilución inicial y sucesivas. ....                                                                           | 119 |
| <b>Figura 30</b> Siembra en por superficie en placas con Agar McConkey y EMB.....                                             | 120 |
| <b>Figura 31</b> Incubación de las placas sembradas. ....                                                                     | 120 |
| <b>Figura 32</b> Pruebas bioquímicas utilizadas en la diferenciación de coliformes (TSI, Citrato de Simmons, MIO, RM-VP)..... | 121 |
| <b>Figura 33</b> Técnica de sedimentación rápida para concentración y recuento de huevos de helmintos.....                    | 121 |
| <b>Figura 34</b> Recuento de colonias posterior al tiempo de incubación. ....                                                 | 122 |
| <b>Figura 35</b> Resultado pruebas bioquímicas de colonias aisladas. ....                                                     | 122 |
| <b>Figura 36</b> Perfil bioquímico de Escherichia coli. ....                                                                  | 123 |
| <b>Figura 37</b> Control de calidad en placas Petri film. ....                                                                | 123 |
| <b>Figura 38</b> Observación de huevos de helmintos a 10 x con Lugol al 1 % como colorante de contraste. ....                 | 124 |

|                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 39</b> Observación de huevos de helmintos a 10 x con Lugol al 1 % como colorante de contraste. .... | 124 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## ABREVIATURAS

|           |                                                                    |
|-----------|--------------------------------------------------------------------|
| ANAA:     | Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.           |
| BES:      | baños ecológicos secos.                                            |
| CENSALUD: | Centro de Investigación y Desarrollo en Salud.                     |
| CM:       | cal de la montaña.                                                 |
| EDAR:     | estaciones depuradoras de aguas residuales.                        |
| HVH:      | huevos viables de helmintos.                                       |
| INDRE:    | Instituto Nacional de Diagnóstico y Referencia Epidemiológica.     |
| NMP:      | número más probable.                                               |
| NOXs:     | óxidos de nitrógeno.                                               |
| PF:       | polvillo de los filtros.                                           |
| PTAR:     | planta de tratamiento de aguas residuales.                         |
| RAFA:     | reactor anaeróbico de flujo ascendente.                            |
| SEMARNAT: | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.                 |
| SOXs:     | óxidos de azufre.                                                  |
| ST:       | sólidos totales.                                                   |
| SUNASS:   | Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento.             |
| TPA:      | tratamiento primario avanzado.                                     |
| TVB-N:    | total de nitrógeno básico volátil (total volatile basic nitrogen). |
| USEPA:    | Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.                 |
| VOC:      | compuestos orgánicos volátiles (volatile organic compounds).       |

## RESUMEN

El presente estudio evaluó la higienización de los lodos residuales deshidratados provenientes de la PTAR Celendín con óxido de calcio (comúnmente llamada cal viva) en el lapso de febrero a junio del año 2024, en ese sentido se realizaron análisis de parámetros: pH, temperatura, huevos de helmintos, *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes*, y por ser elementos que causan daños a la salud pública y el medio ambiente si no son manejados y utilizados adecuadamente. El objetivo principal fue remover huevos de helmintos, *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes* con la aplicación de óxido de calcio a los lodos residuales deshidratados en la planta de tratamiento de aguas residuales Celendín, para ello se realizaron cuatro tratamientos (T<sub>0</sub>: 0 g, T<sub>1</sub>: 10 g, T<sub>2</sub>: 50 g y T<sub>3</sub>: 100 g) (0, 2, 10 y 20 %) en peso de óxido de calcio aplicados a 500 g (100 %) en peso respectivamente de lodo residual secundario deshidratado, diez repeticiones durante cinco meses con frecuencia quincenal, los resultados fueron comparados con la normativa nacional vigente Decreto Supremo N° 015-2017 - MVCS. La remoción total para huevos de helmintos se logró con los tratamientos T<sub>2</sub>: 50 g y T<sub>3</sub>: 100 g de óxido de calcio con valores menores a 1 /4g; y para *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes* se logró una remoción total con el T<sub>3</sub>: 100 g de óxido de calcio con valores menores a 1000 NMP/g, cumpliendo para los tratamientos descritos con las características de lodo residual deshidratado Clase A pudiendo ser aplicables al suelo sin restricciones sanitarias. Se aceptó la hipótesis planteada inicialmente: el porcentaje de remoción de huevos de helmintos, *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes* con óxido de calcio de los lodos residuales deshidratados en la planta de tratamiento de aguas residuales Celendín es de 70 %.

**Palabras clave:** PTAR, lodo residual, óxido de calcio, patógenos.

## ABSTRACT

The present study evaluated the sanitation of dehydrated secondary wastewater sludge from the Celendín WWTP with calcium oxide (commonly called quicklime) in the period from February to June 2024, in this sense analysis of parameters was carried out: pH, temperature, helminth eggs, *Escherichia coli* and *Enterobacter aerogenes*, and for being elements that cause damage to public health and the environment if they are not properly managed and used. The main objective was to remove eggs from helminths, *Escherichia coli* and *Enterobacter aerogenes* with the application of calcium oxide to the secondary wastewater sludge in the Celendín wastewater treatment plant, for this four treatments were carried out (T<sub>0</sub>: 0 g, T<sub>1</sub>: 10 g, T<sub>2</sub>: 50 g and T<sub>3</sub>: 100 g) (0, 2, 10 and 20 %) by weight of calcium oxide applied to 500 g (100 %) by weight respectively of sewage sludge dehydrated secondary school, ten repetitions for five months with a biweekly frequency, the results were compared with the current national regulations Supreme Decree No. 015-2017 - MVCS. Total removal of helminth eggs was achieved with treatments T<sub>2</sub>: 50 g and T<sub>3</sub>: 100 g of calcium oxide with values less than 1 /4g; and for *Escherichia coli* and *Enterobacter aerogenes*, total removal was achieved with T<sub>3</sub>: 100 g of calcium oxide with values less than 1000 NMP/g, complying with the characteristics of Class A Biosolid for the treatments described and being applicable to the soil without sanitary restrictions. The hypothesis initially raised was accepted: the percentage of removal of eggs of helminths, *Escherichia coli* and *Enterobacter aerogenes* with calcium oxide from the wastewater sludge in the Celendín wastewater treatment plant is 70 %.

**Keywords:** WWTP, waste sludge, quicklime, pathogens.

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

El escenario internacional nos muestra que existen muchas tendencias de reúso responsable y económicamente sostenible de los lodos residuales deshidratados generados en las PTAR, que son un problema en términos de su manejo; ya que, cuando estos lodos residuales deshidratados no son acondicionados y se remueven los componentes patógenos y tóxicos presentes, pudiendo ocasionar problemas a la salud humana y a la calidad ambiental del entorno donde se disponen o almacenan. En Europa se genera un promedio 10,9 millones de toneladas al año, teniendo consigo impactos negativos relacionados con su inadecuada gestión, disminuyendo la calidad ambiental y deteriorando la salud humana afectando el sistema respiratorio, generación de afecciones en la piel debido a que contiene una gran variedad de elementos patógenos y sustancias tóxicas tales como: amoníaco, metano, ozono troposférico y compuestos halogenados (Linares, 2020).

La Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS, 2022); menciona que, en el país de un total de 201 PTAR, pocos son los proyectos que puedan llamarse exitosos. Además, reitera que, por el contrario, una PTAR eficaz logra un impacto positivo sobre el ambiente. Los impactos directos incluyen la disminución de molestias y de los peligros para la salud pública en el área colindante a las PTAR, mejoramiento de la calidad y aumento del uso beneficioso de las aguas receptoras con respecto a la descarga de aguas residuales crudas (p.7).

En la región Cajamarca, la ciudad de Celendín cuenta con una PTAR del tipo RAFA (Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente), donde se puede apreciar un mal manejo de los lodos residuales deshidratados ya que son dispuestos como enmienda para cultivos y para venta a los usuarios que desean comprar el lodo residual (lodo residual) deshidratado en los lechos de secado; sin tener ningún tipo de control de calidad ni un tratamiento previo que asegure la inocuidad del producto. Por lo tanto, el presente trabajo muestra que el uso responsable y ambiental del óxido de calcio para la estabilización de los lodos residuales deshidratados de la PTAR de Celendín para tres componentes patógenos presentes comúnmente en estos, es una alternativa recomendable para su gestión.

Tratar los lodos residuales deshidratados en la PTAR de Celendín no es solo una necesidad técnica o normativa, sino una responsabilidad ética, ambiental y sanitaria que debe ser asumida con seriedad por las autoridades locales, las empresas de agua y la ciudadanía. Su gestión adecuada protege los ecosistemas, reduce la huella ambiental, y promueve una mejor calidad de vida para todos. La adecuada gestión de los lodos residuales deshidratados provenientes de la PTAR es esencial en la protección del medio ambiente y de la salud pública, especialmente en contextos urbanos en crecimiento como la ciudad de Celendín. Estos residuos semisólidos contienen altas cargas de materia orgánica, microorganismos patógenos, metales pesados y otros contaminantes que, de no ser tratados adecuadamente, pueden representar una amenaza significativa para el entorno y las personas. Desde el punto de vista ambiental, los lodos residuales deshidratados sin tratamiento pueden provocar la contaminación de suelos, cuerpos de agua y aire entre otros componentes del ecosistema. Su disposición inadecuada favorece la filtración de lixiviados a las fuentes subterráneas y superficiales, afectando directamente a los ecosistemas locales y a la disponibilidad de agua limpia. En una ciudad como Celendín, donde el acceso al agua segura es

fundamental para la vida agrícola y ganadera, la contaminación hídrica puede tener consecuencias socioeconómicas serias. Además, la descomposición no controlada de estos residuos emite gases de efecto invernadero, como el metano, que contribuyen al cambio climático. En términos de salud pública y humana, los lodos residuales deshidratados contienen agentes patógenos como bacterias, virus, protozoarios y huevos de parásitos intestinales. Si no se tratan correctamente, estos organismos pueden diseminarse a través del contacto directo, insectos vectores, o por medio de alimentos contaminados, generando brotes de enfermedades infecciosas, especialmente en poblaciones vulnerables como niños y ancianos. Asimismo, la presencia de metales pesados puede tener efectos tóxicos acumulativos a largo plazo en la salud humana, afectando órganos vitales y sistemas hormonales.

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en la PTAR de la ciudad de Celendín durante el año 2024, tuvo como objetivo general determinar la remoción de huevos de Helminths, *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes* con óxido de calcio de los lodos residuales deshidratados en la PTAR. y como objetivos específicos: determinar la remoción de huevos de helmintos en los lodos residuales deshidratados de la PTAR, con la aplicación de óxido de calcio, luego evaluar la remoción de *Escherichia coli* en los lodos residuales secundarios de la PTAR, con la aplicación de óxido de calcio; analizar la remoción de *Enterobacter aerogenes* en los lodos residuales deshidratados de la PTAR, con la aplicación de óxido de calcio.; y finalmente, determinar la cantidad en peso de óxido de calcio luego de la aplicación en diversas proporciones para analizar el porcentaje de remoción de huevos de helmintos, *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes* de los lodos residuales deshidratados en la PTAR. Demostrando que el óxido de calcio tiene un efecto beneficioso en la estabilización de los lodos residuales deshidratados de las PTAR, siendo una alternativa ambiental y económica muy buena.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de la investigación**

Sánchez et al. (2024) evaluaron en su trabajo de investigación “Evaluación del tratamiento alcalino con óxido de calcio (CaO) para la reducción de microorganismos en lodos residuales deshidratados generados en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Vía Puerto Mosquito, Aguachica, Colombia”, el tratamiento alcalino con óxido de calcio (CaO) para reducción de microorganismos en los lodos residuales deshidratados procedentes de la PTAR vía Puerto Mosquito en Aguachica, Cesar. Metodología: el proceso implica la adición de óxido de calcio al lodo residual, lo que eleva el pH del medio y crea un ambiente hostil para la supervivencia de microorganismos patógenos y bacterias. Los resultados de la evaluación proporcionaron información sobre la eficiencia del tratamiento alcalino con óxido de calcio en la reducción de microorganismos patógenos y la mejora de la calidad general de los lodos residuales con la concentración de 45 %. El tratamiento alcalino de lodos residuales con óxido de calcio (CaO) fue efectivo para la reducción de patógenos y disminución de humedad, aunque presenta desafíos en la formación de grumos y el mantenimiento de temperaturas elevadas. La estabilidad del pH es crucial para la efectividad del proceso. Cada una de las dosificaciones de óxido de calcio (CaO) empleadas en los lodos residuales generados en la PTAR vía Puerto Mosquito son eficaces para la

reducción de microorganismos patógenos; sin embargo, se demostró que a mayor cantidad de alcalinizante es mayor la reducción de microorganismos, permitiendo alcanzar la disminución total de bacterias Gram Positivas y Gram Negativas, presentes en el Agar Sangre. No obstante, a partir de una concentración de 15 % p/p el pH no es una variable para tener en cuenta para la disminución de microorganismos. La adición de cal aumenta la temperatura de los lodos tratados (46 °C – 50 °C), especialmente a una concentración del 45 %. A pesar de ello, estas temperaturas no se mantienen el tiempo mínimo recomendado por la EPA para la eliminación de patógenos (p. 13).

Ayala et al. (2022) en su trabajo titulado “Higienización de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de Manchay, y su uso como insumo de cultivo en el año 2021” determinaron la higienización de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de Manchay en Huancayo, y su uso como insumo de cultivo en el año 2021, tuvieron como objetivo evaluar la capacidad de tratamiento de lodos de PTAR Manchay y se verificó la eficacia de su uso como insumo de cultivo. Al realizar los análisis preliminares de lodos, después de comparar con las regulaciones, mostraron cumplimiento con los parámetros químicos, sin embargo, no se cumplieron los requisitos, parámetros biológicos (Salmonella) según D.S. N° 015-2017-Vivienda. Posteriormente se realizó la higienización aplicando óxido de calcio los días 20 y 30 % por un período de 7 días, luego analizado en el laboratorio, para determinar Grado y destino de uso según Decreto N° 015-2017- Reglamento y la Normativa oficial de México-004-SEMARNAT-2002 del Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SERMANAT). Los resultados mostraron barro tratado con óxido de calcio 20 % se clasifica como clase B a diferencia de los lodos de depuradora tratado con 30 % de óxido de calcio calificados A para ambas regulaciones. Finalmente, realizando un análisis de costo-beneficio, se estimó que el tratamiento de lodos es una alternativa beneficiosa y óptima por el reducido costo que genera al reutilizarse lodo, en

comparación con los costos actualmente dados para cambiar a un relleno sanitario. Se concluyó que es posible la higienización de los lodos de la PTAR de Manchay y su uso como insumo en los cultivos de zanahoria y betarraga, además que su implementación permite una reducción en los costos de traslado (p.7).

Cárdenas (2022) en su trabajo de investigación “Alternativas de gestión de lodos residuales. Caso de estudio: Laguna de estabilización de Ábrego, Norte de Santander”, estableció alternativas efectivas para el manejo de lodos en el caso de estudio de la laguna estable de Ábrego, Norte de Santander en Colombia; determinó el estado actual de la laguna y estimó el volumen de lodo contenido en ella. Determinó las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos provenientes del tanque de estabilización. Las opciones de gestión como la extracción, tratamiento y aprovechamiento de los lodos se analizaron en base a criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales. La extracción de lodos se realiza por vía seca. El volumen de lodo es de  $9.877 \text{ m}^3$  y el volumen de lodo a tratar es de  $7.901 \text{ m}^3$ , quedando un 20 % de inóculo remanente para descomponer el lodo nuevo. Los lodos contienen microorganismos como *Salmonella sp*, coliformes fecales y metales pesados. En resumen, los lodos de la laguna estabilizada Ábrego, con base en la normatividad vigente y los resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica, fueron clasificados como clase B, la cual tiene más restricciones en su uso que la clase A según el reglamento del Decreto 1287 de 2014. Sin embargo, la estabilización del lodo previamente extraído y deshidratado aumentará su usabilidad. Se determinó que las alternativas más efectivas para el manejo de lodos en el caso de estudio fueron la minería húmeda, deshidratación de lodos con tubos geosintéticos, estabilizados mediante compostaje de paja de trigo y uso de lodos como fertilizante (p.8).

Cárdenas y Molina (2022) mencionan en su investigación “Alternativas para tratar lodos originados en sistemas de tratamiento de aguas residuales: una revisión” en Medellín Colombia, que han demostrado la eficiencia de diversos tratamientos para lodos. Sin embargo, se han presentado nuevas alternativas que ameritan una revisión actualizada. Tuvieron como objetivo realizar dicha actualización con respecto a técnicas convencionales y nuevas para tratar los lodos. Se basaron en una revisión de documentos en diversas bases de datos, agrupando en primera instancia las alternativas convencionales y posteriormente las nuevas, constituidas ambas por alternativas de técnicas de espesamiento, estabilización y deshidratación de lodos, y analizándolas con base en criterios económicos, técnicos y ambientales. Se encontró que la ósmosis directa es una de las alternativas más prometedoras en el espesamiento de lodos, la oxidación de agua supercrítica y la pirolisis en la estabilización y la filtración al vacío en la deshidratación de dichos subproductos. El espesamiento como en la estabilización, las nuevas alternativas tienen eficiencias altas, mientras la filtración al vacío, una alternativa convencional, mejoró su rendimiento mediante el uso del floculante modificado, destacándose en la deshidratación de lodos. Es por ello que se requieren más investigaciones que mejoren los desafíos y rendimientos presentes e indaguen sobre la liberación al ambiente de contaminantes al utilizar los lodos residuales deshidratados . Tratamientos como el espesamiento, la estabilización y la deshidratación se aplican en diversos países con el fin de reducir microorganismos, humedad, metales pesados y olores desagradables y, aunque comúnmente se emplean alternativas como la digestión anaerobia y aerobia para el tratamiento de los lodos in situ, la eliminación de los microorganismos patógenos puede ser muy lenta y algunos parásitos como los helmintos pueden seguir activos aún después del tratamiento, dando paso a la necesidad de investigar nuevas alternativas (p.2).

Huanca et al. (2022) determinaron en su estudio de investigación “Estabilización alcalina de lodos de PTAR para obtener lodo residual deshidratado tipo A” en Juliaca, Perú; afirman que, el efecto alcalinizante de la óxido de calcio (CV), cal de la montaña (CM) y polvillo de los filtros (PF) sobre los lodos obtenidos de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR); consistió en 6 tratamientos, todos los tratamientos tuvieron un periodo de experimentación de 13 días, se evaluaron parámetros fisicoquímicos, toxicidad química y estabilización del proceso de alcalinización de lodos, la estabilización alcalina con lodos de PTARD logró resultados satisfactorios con los tratamientos T2 (óxido de calcio 8 % + lodo 92 %) y T3 (óxido de calcio 12 % + lodo 88 %), T4 (óxido de calcio de montaña 16 % + lodo 84 %), T5 (polvillo Maerz 30 % + lodo 70 %) y T6 (polvillo Rotax 30 % + lodo 70 %) que garantizaron una eficiente reducción en la cantidad de microorganismos patógenos. Respecto a la estabilización alcalina con óxido de calcio, el T2 (óxido de calcio 8 % + lodo 92 %), T3 (óxido de calcio 12 % + lodo 88 %) y T6 (polvillo Rotax 30 % + lodo 70 %) lograron elevar el pH a 12 por un periodo mayor a 72 horas; en relación a toxicidad química, los tratamientos T2, T3, T4, T5 y T6 cumplen con los parámetros establecidos. Se concluye que los tratamientos T2 (óxido de calcio 8 % + lodo 92 %), T3 (óxido de calcio 12 % + lodo 88 %) y T6 (polvillo Rotax 30 % + lodo 70 %) son los que mejor comportamiento tuvieron durante el proceso de estabilización de lodos para obtener lodos residuales deshidratados de tipo A (p.25).

Malcheva et al. (2022) estudió la dinámica de los indicadores microbiológicos de lodos frescos de plantas de tratamiento de aguas residuales con una concentración de CaO, 10% y 20%, y cenizas, -30% y 50%, y tratados con cal viva, cenizas y fertilizante microbiano durante un período de compostaje de 50 días. La influencia de la temperatura, el contenido de agua y el oxígeno en el desarrollo de microbios se estableció en condiciones de laboratorio. El análisis

microbiológico incluyó la determinación de microorganismos no patógenos (bacterias no formadoras de esporas, bacilos, actinomicetos, micromicetos, bacterias que digieren nitrógeno mineral) y patógenos (*Salmonella*, *Listeria*, *Escherichia coli*, *Enterococcus*, *Clostridium perfringens*). De la microflora beneficiosa en el lodo antes del tratamiento, la cantidad de bacterias no formadoras de esporas fue la más alta, seguida de bacilos y micromicetos. Se encontró que los actinomicetos estaban ausentes en el lodo no tratado. *Clostridium perfringens* ocupó una parte importante en la composición de la microflora patógena, seguida de *Escherichia coli*, *Enterococcus* y *Listeria*. Los mejores resultados para la descontaminación de los lodos se obtuvieron mediante la adición de un 20% de cal viva y un 50% de cenizas. La alcalinización de los lodos después del tratamiento condujo a la destrucción de la microflora patógena, pero también redujo el número de microorganismos beneficiosos. La disminución del pH durante el período de estudio determinó el redesarrollo de la microflora patógena. Las variantes combinadas con cal o ceniza y fertilizante microbiano mostraron mejores resultados para el desarrollo de microflora no patógena y la destrucción de patógenos.

Saldaña y Castillo (2021) desarrollaron su trabajo de investigación “Alternativas para la estabilización de lodos generados en estaciones depuradoras de aguas residuales desde un enfoque sistémico: una revisión” en Aguachica, Colombia; acerca del crecimiento demográfico y los problemas ambientales en el ámbito local, nacional e internacional, relacionados con la contaminación de los lodos sin tratar, debido a los volúmenes en aumento de dichos residuos generados por las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), aumenta la degradación del medio ambiente. Evaluaron la literatura científica sobre las alternativas implementadas en la estabilización de lodos residuales generados en las EDAR, mediante una revisión documental y un análisis bibliométrico basado en la construcción de diagramas estratégicos y mapa de coocurrencia,

con el fin de identificar las tendencias de investigación en la temática. Se obtuvieron 1693 documentos enmarcados en las alternativas de estabilización de lodos residuales deshidratados provenientes de las EDAR, lo que permitió identificar que países como Estados Unidos, China, Brasil y España poseen la mayor producción científica sobre la temática. Las alternativas convencionales más empleadas para el tratamiento de lodos residuales deshidratados son la digestión anaerobia, el espesamiento, la deshidratación y la incineración, que son eficientes en la gestión, pero desaprovechan el potencial de dichos residuos. Las alternativas como el compostaje y la lombricultura generan subproductos que se pueden aprovechar y de esta forma lograr una disposición final de manera adecuada, que reduzca los costos operacionales y genere beneficios económicos (p.175).

Sánchez (2021) indica en su trabajo de investigación titulado “Mejoramiento de la calidad del lodo de la PTAR Lagos de Lindora, en San José, Costa Rica” que, un manejo inadecuado de los lodos puede traer graves consecuencias para los ecosistemas y la salud pública. En la PTAR Lagos de Lindora (Santa Ana, San José), se producen anualmente 30,8 toneladas de lodo digerido aeróbicamente y deshidratado por lechos de secado, que son dispuestos actualmente en sus instalaciones. Planteó tres opciones de tratamiento orientadas a disminuir la carga patógena, con lo que se pretende generar un lodo residual deshidratado seguro y con la calidad óptima para que sea aprovechable, según los parámetros establecidos en la normativa costarricense. Los tratamientos fueron secado solar a dos diferentes alturas de lecho (0.15 m y 0.20 m) y 4 tiempos de secado (5, 10, 17 y 24 días), alcalinización con tres dosificaciones de CaO (0.12, 0.20 y 0.25 g/g) y dos tiempos de contacto (2 y 24 h), además de un secado solar con posterior adición de cal a los 5 y 10 días de exposición al sol, con dosis de 0.20 y 0.25 g/g por un tiempo de contacto de 24 h. Con el secado solar después de 17 días se consiguió alcanzar el porcentaje de humedad

requerido, los parámetros microbiológicos se encontraron muy por encima de los LMP para un lodo residual deshidratado clase B. La alcalinización permitió eliminar gran parte de los patógenos, pero no contribuyó a la deshidratación del lodo. El secado solar durante 17 días junto con alcalinización al quinto día de secado fue el tratamiento que mostró los resultados más favorables en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, generando un lodo residual deshidratado de clase B. El tratamiento propuesto es económicamente factible y el lodo residual deshidratado cuenta con una gran cantidad de nutrientes que lo hacen apto para el uso en actividades agrícolas o enmienda de suelos (p.7).

Castillo et al. (2020) en su investigación “Alternativas en la estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales” desarrollado en Mamabí, Ecuador; realizaron una caracterización físico-química y microbiológica en cuanto a humedad, proteínas, acidez, análisis del total de nitrógeno básico volátil (TVB-N), materia orgánica, metales pesados y parámetros microbiológicos con la finalidad de establecer la clase de lodo en base a las normativas ambientales internacionales, tales como Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA), norma de la directiva europea y norma oficial mexicana, debido a la ausencia de estas en el Ecuador. La concentración de metales se encontró entre límite máximo de concentraciones estipulados por las tres normativas analizadas. En cuanto a los resultados de coliformes fecales se obtuvo  $2,4 \times 10^4$  UFC/g, correspondiendo a un lodo de clase B según la USEPA; y a un lodo de clase C de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana. Dándonos un panorama general de los diferentes métodos de estabilización de lodos, en el cual se sugiere la utilización de cal debido a evidencias experimentales por diferentes investigaciones, siendo esta una de las más accesibles y eficientes. De acuerdo a la caracterización físico química y microbiológica de los lodos residuales, corresponden a un lodo de clase B por contener más de 1000 UFC/g de coliformes

fecales según la USEPA; y a un lodo de clase C de acuerdo a la norma oficial mexicana por poseer menos de 2 000 000 UFC/g, siendo aptos para actividades agrícolas o recuperación de suelos, después de ser tratados y convertidos en lodos residuales deshidratados . La estabilización del lodo mediante la aplicación de cal es una opción que permite mejorar sus características, aumentando su potencial de aplicación con menor riesgo al medio ambiente y a la salud pública (p. 23).

Quiroz (2020) en su estudio titulado “Tratamiento físico-químico para la remediación de lixiviados del relleno sanitario Naranjal mediante la aplicación de cal, zeolita y cloro” en Guayaquil, Ecuador; se enfocó en evaluar la aplicación de cal, zeolita e hipoclorito de calcio como tratamientos físicos-químicos para la depuración de lixiviados provenientes del Relleno Sanitario Naranjal Cantón Naranjal, provincia del Guayas. Se establecieron diez tratamientos (T) con tres repeticiones: Cal hidratada T1 (1 g), T2 (3 g), T3 (7 g); Hipoclorito de Calcio T4 (1 g), T5 (2 g), T6 (3 g); Zeolita T7 (15 g), T8 (30 g), T9 (40 g), mientras que, el T10 se compuso de las mejores dosis de cada reactivo (Cal hidratada 3 g e hipoclorito de calcio 1 g) dejando de lado a la zeolita por no mostrar eficacia en la remoción de los contaminantes. Mediante las pruebas de laboratorio se determinó que para sólidos totales y coliformes totales el T10 fue el más eficiente con una remoción del 98,41 % y 100 % respectivamente, para la turbidez el T3 mostró el mejor resultado en dosis de 7 g con una remoción de 94% similar al T10 93,8 %. Por último, para sólidos suspendidos totales el hipoclorito de calcio obtuvo los mejores resultados 97,65 % aplicando 1g similar al T10 95,71 % y el pH al aplicar 2 g se mantuvo dentro de los límites permisibles. Llegando a concluir que el T10 por ser un tratamiento completo (coagulación-floculación y oxidación) es adecuado para la remoción de lixiviados.

Gheethi et al. (2018) consideran que la reutilización de aguas residuales tratadas para riego es una importante fuente alternativa de agua en la nueva estrategia de gestión del agua de los países

que enfrentan una grave deficiencia de recursos hídricos como los países de Oriente Medio. La materia orgánica y los elementos fertilizantes contenidos en los lodos residuales deshidratados son esenciales para mantener la fertilidad del suelo. Sin embargo, tanto las aguas residuales tratadas como los lodos residuales deshidratados contienen una gran diversidad de patógenos que se transmitirían al medio ambiente e infectarían a los humanos directa o indirectamente. Por lo tanto, esos patógenos deben reducirse a partir de las aguas residuales tratadas y los lodos residuales deshidratados antes de su reutilización en la agricultura. Este documento revisa las consideraciones para la reutilización de aguas residuales tratadas y lodos residuales deshidratados en la agricultura y otros tratamientos utilizados para la reducción de bacterias patógenas. Se han revisado los métodos de tratamiento utilizados para la reducción de patógenos en estos desechos. Parecía que la principal preocupación asociada con la reducción de bacterias patógenas radica en su capacidad para volver a crecer en las aguas residuales tratadas y los lodos residuales deshidratados . Por lo tanto, el método de tratamiento efectivo es que tiene el potencial de destruir las células patógenas y eliminar los nutrientes para evitar el recrecimiento o la recontaminación del entorno circundante. La eliminación de nutrientes puede ser aplicable en las aguas residuales, pero no en los lodos residuales deshidratados debido al alto contenido de nutrientes. Sin embargo, la reducción del riesgo para la salud en los lodos residuales deshidratados podría llevarse a cabo regulando la utilización de lodos residuales deshidratados y seleccionando las especies de plantas cultivadas en el suelo fertilizado con lodos residuales deshidratados (p. 73).

Zacarias et al. (2014) evaluaron el desempeño de dos sistemas de tratamiento en la reducción de indicadores de contaminación biológica en aguas residuales de producción porcina. El Sistema I consistía en dos reactores de manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB), con 510 y 209 L de volumen, dispuestos en serie. El Sistema II consistió en un reactor UASB, un

filtro anaeróbico, un filtro percolador y un decantador, que también se organizaron en serie, con volúmenes de 300, 190, 250 y 150 L, respectivamente. Los tiempos de retención hidráulica (TRH) aplicados en los primeros reactores UASB fueron de 40, 30, 20 y 11 h en los sistemas I y II. Las eficiencias promedio de eliminación de coliformes totales y termotolerantes en el sistema I fueron del 92,92% al 99,50% y del 94,29% al 99,56%, respectivamente, y aumentaron en el sistema II al 99,45% al 99,91% y del 99,52% al 99,93%, respectivamente. Las tasas promedio de remoción de huevos de helmintos en el sistema I fueron de 96,44% a 99,11%, alcanzando el 100% como en el sistema II. En los lodos del reactor, los recuentos de coliformes totales y termotolerantes oscilaron entre 105 y 109 MPN (100 mL)<sup>-1</sup>, mientras que los huevos de helmintos oscilaron entre 0,86 y 9,27 huevos g<sup>-1</sup> TS (p. 1).

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Agua residual doméstica**

Se consideran como aquellas aguas usadas en actividades domésticas que, una vez vertidas, contienen materia orgánica, microorganismos y nutrientes que requieren tratamiento para su reúso. (Véliz et al. 2020).

### **2.2.2. Lodo primario**

Es el residuo semisólido que se forma durante la sedimentación primaria de las aguas residuales, compuesto principalmente por sólidos suspendidos sedimentables, materia orgánica cruda y grasas (Tchobanoglous et al., 2021).

### **2.2.3. Lodo secundario**

Es el lodo generado en los procesos biológicos de tratamiento (lodos activados, biodiscos o filtros percoladores), conformado por biomasa microbiana y sólidos orgánicos estabilizados parcialmente (Metcalf y Eddy, 2022).

### **2.2.4. Lodo residual**

El término lodo residual se refiere a un subproducto semisólido generado durante el tratamiento de aguas residuales municipales o industriales que contiene sólidos suspendidos, materia orgánica, microorganismos, nutrientes y contaminantes (por ejemplo, metales pesados), separado del agua por procesos físicos, químicos y/o biológicos (Orozco, 2025).

### **2.2.5. Lodo residual deshidratado**

El lodo residual deshidratado es el residuo sólido o semisólido que resulta de someter lodo residual (proveniente de tratamientos de aguas residuales municipales o industriales) a procesos que remueven una parte significativa del contenido de agua, reduciendo su humedad y aumentando su concentración de materia seca. Este producto resultante tiene menor volumen y peso, facilitando su transporte, manejo y disposición o reutilización (Huang, et al. 2024).

### **2.2.6. Lodos de aguas residuales domésticas**

Los lodos de aguas residuales domésticas son el subproducto semisólido generado durante el tratamiento físico, químico y biológico de las descargas domiciliarias. Se caracterizan por estar compuestos principalmente de agua (65–80 %), sólidos suspendidos, materia orgánica biodegradable, nutrientes (nitrógeno y fósforo), metales traza y una densa comunidad microbiana (Wu et al., 2021; Zhang et al., 2020). Estos lodos representan uno de los mayores desafíos en la gestión de aguas residuales, ya que requieren procesos de estabilización, deshidratación y disposición final segura para evitar impactos ambientales y riesgos sanitarios.

### **2.2.7. Características químicas de los lodos**

Menciona Porras (2020) que las características químicas o fisicoquímicas de un lodo determinan las necesidades de tratamiento y las opciones de disposición final posible. La composición química de los lodos residuales deshidratados varía dependiendo de su origen y métodos de tratamiento. Como resultado de los procesos de tratamiento, los elementos químicos contaminantes del influente pasan a formar parte de los lodos ya sea por precipitación o por participación entre la fase líquida durante el proceso de separación de los sólidos (Kumate, 1990).

Además de contener sustancias contaminantes los lodos residuales deshidratados poseen nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. En los lodos residuales deshidratados se encuentran 16 elementos esenciales, estos son: nitrógeno, fósforo, potasio, carbono, hidrogeno, azufre, calcio, magnesio, fierro, boro, cobre, manganeso, zinc, cloro y molibdeno (p. 18).

### **2.2.8. Macronutrientes**

Los elementos reconocidos como macronutrientes son: nitrógeno, fósforo, potasio, carbono, hidrogeno, calcio, magnesio y azufre. Aunque los lodos residuales deshidratados contienen niveles relativamente bajos de macro y micronutrientes, cuando son aplicados en el suelo pueden suministrar todo el nitrógeno necesario, fósforo, calcio, magnesio y muchos otros elementos, este valor fertilizante del lodo está basado primordialmente en el contenido de N, P y K (p. 23).

### **2.2.9. Micronutrientes**

Los micronutrientes tales como el fierro, zinc, cobre, manganeso, boro, molibdeno, sodio, vanadio y cloro son necesarios para las plantas en pequeñas cantidades, el suelo y el pH de los lodos residuales deshidratados influyen en la biodisponibilidad, todos los metales excepto el molibdeno, son más biodisponibles en pH bajo (ambiente ácido) (p. 23).

#### **2.2.10. *Materia orgánica***

Otra propiedad importante de los lodos residuales deshidratados es que poseen materia orgánica que tiene un efecto sobre las propiedades físicas del suelo tal como la fertilidad, contenido de humus, porosidad y retención de agua.

El alto contenido de carbono orgánico de los lodos residuales deshidratados provee una inmediata fuente de energía para los organismos del suelo, así los microorganismos descomponen la materia orgánica de los lodos residuales deshidratados y usan algunos productos para reproducción y como resultados cambian la materia orgánica y liberan ciertos productos de descomposición en el ambiente (p. 24).

#### **2.2.11. *Caracterización de los lodos residuales de PTAR en Perú***

Según Porras y Vizcaino (2020) la caracterización de los lodos permite saber si estos son identificados como peligrosos o no, para así poder determinar mejor el método de manejo, se sabe también que las características dependen de la fuente u origen (p.15). En la tabla 1 se presenta las características mínimas que se deben tomar en cuenta al caracterizar los lodos.

**Tabla 1***Composición y características de los lodos residuales.*

| Parámetros                            | Lodos primarios                   | Lodos secundarios | Lodos digeridos |
|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------|
| Ph                                    | 5.5 – 6.5                         | 6.5 – 7.5         | 6.8 – 7.6       |
| Contenido de agua (%)                 | 92 – 96                           | 97.5 - 98         | 94 – 97         |
| Sólidos suspendidos Volátiles (% SSV) | 70 – 80                           | 80 - 90           | 55 – 65         |
| Grasas (%)                            | 12 – 14                           | 3 - 5             | 4 – 12          |
| Proteínas (%)                         | 4 – 14                            | 20 - 30           | 10 – 20         |
| Carbohidratos (%)                     | 8 – 10                            | 6 – 8             | 5 – 8           |
| Nitrógeno (N)                         | 2 – 5                             | 1 - 6             | 3 – 7           |
| Fósforo (%)                           | 0.5 – 1.5                         | 1.5 – 2.5         | 0.5 – 1.5       |
| Bacterias patógenas (NMP 100 mL)      | 10 <sup>3</sup> - 10 <sup>5</sup> | 100 - 1000        | 10 – 100        |
| Metales pesados (% Zn, Cu, Pb)        | 0.2 – 2                           | 0.2 - 2           | 0.2 - 2         |

*Nota:* Composición y características de los lodos que se deben tomar en cuenta al caracterizar los lodos. NMP: número más probable. Fuente: Castro et al. (2007).

Según el Decreto Supremo N° 015-2017- del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS, 2017) el cual se adjunta en los anexos del presente trabajo (Anexo 7.1.), se muestra un detalle de la Clasificación y parámetros para la producción de Lodos residuales deshidratados, Parámetro de estabilización, Parámetro de toxicidad química, Parámetros de higienización, Frecuencia del monitoreo de los parámetros y el Capítulo VI. Supervisión y fiscalización aplicable a los agentes asociados a la producción y el reaprovechamiento de lodos

residuales deshidratados. El productor puede producir lodos residuales deshidratados que, de acuerdo a sus características, se clasifican en:

**2.2.11.1. Lodo residual deshidratado de Clase A:** Son aquellos aplicables al suelo sin restricciones sanitarias.

**2.2.11.2. Lodo residual deshidratado de Clase B:** Son aquellos aplicables al suelo con restricciones sanitarias según localización de los suelos y/o tipo de cultivo.

## **2.2.12. Huevos de helmintos**

### **2.2.12.1. Huevos viables de helmintos (HVH).**

Formas ovíparas (huevos) producidas por helmintos parasitarios (nemátodos, céstodos o tremátodos) que, tras su eliminación en las heces, mantienen la capacidad infectiva (es decir, contienen embriones o larvas viables o pueden desarrollarlas bajo condiciones ambientales favorables) y por tanto representan el estadio infectante y el principal riesgo de transmisión ambiental cuando están presentes en aguas, suelos o biosólidos (Ward et al., 2022).

### **2.2.12.2. Aspectos microbiológicos generales.**

Los huevos de helmintos presentan una cubierta multicapa que cumple funciones esenciales de protección, permeabilidad selectiva y evasión inmunológica. Se distinguen tres capas principales:

- Capa externa quitino-proteica: aporta resistencia mecánica frente a agentes químicos y físicos.
- Capa media lipoproteica: regula la entrada de agua y nutrientes.
- Capa interna vitelina: protege directamente el embrión u oncosfera.

En función de su estado de desarrollo, los huevos pueden encontrarse embrionados (infectivos) o no embrionados (requieren maduración ambiental). Esta característica es clave en el diagnóstico parasitológico (Maurelli et al., 2021; Sohn y Chai, 2024).

### **2.2.12.3. Estructura y composición del huevo - anatomía y capas.**

#### **A. *Nemátoda* (*Nemátodos*)**

- *Ascaris spp.* (*Ascarididae*): Huevos grandes con cubierta mamelonada. Su resistencia microbiológica se debe a lípidos hidrofóbicos que impiden la desecación. Requieren oxigenación ambiental para desarrollar larvas infectivas.
- *Trichuris trichiura* (*Trichuridae*): Huevos en forma de barril con tapones polares. No son infectivos al ser expulsados, requieren entre 14 y 21 días en el suelo para embrionar (Ryoo et al., 2023).
- *Enterobius vermicularis* (*Oxyuridae*): Huevos ovalados y asimétricos, embrionan rápidamente en ambientes húmedos.
- *Ancylostomatidae* (*Necator*, *Ancylostoma*): Huevos transparentes con embriones en división temprana. Embrionan en 1–2 días en climas cálidos.

#### **B. *Platyhelminthes* (*Platelmintos*)**

##### **a. Tremátoda.**

- Fasciola hepática (*Fasciolidae*): Huevos operculados, grandes (120–150  $\mu\text{m}$ ). No embrionados al ser eliminados; necesitan ambiente acuático para desarrollar miracidio (Mahapatra et al., 2022).
- *Clonorchis sinensis* y *Opisthorchis spp.* (*Opisthorchiidae*): Huevos pequeños (20–30  $\mu\text{m}$ ), con hombros operculares. Ya contienen miracidio embrionado al momento de la expulsión (Sohn y Chai, 2024).

- *Paragonimus westermani* (*Paragonimidae*): Huevos operculados de 80–120 µm, parcialmente embrionados al ser expulsados.
- *Schistosoma spp.* (*Schistosomatidae*): Huevos sin opérculo, con espinas laterales o terminales. Contienen miracidio activo. Su cubierta antigénica induce respuesta granulomatosa (Ward et al., 2022).

#### **b. Céstoda.**

- *Taenia spp.* (*Taeniidae*): Huevos esféricos de 30–40 µm, con cubierta gruesa estriada. Contienen oncosfera hexacanta infectiva.
- *Hymenolepis nana* (*Hymenolepididae*): Huevos de 30–50 µm con membrana interna y filamentos polares. Infectivos al ser expulsados.
- *Diphyllobothrium latum* (*Diphyllobothriidae*): Huevos operculados de 55–75 µm, no embrionados, requieren agua dulce para liberar coracidio ciliado (Sohn y Chai, 2024).

#### **2.2.12.4. Embriogénesis, eclosión y factores que inducen la eclosión.**

Los huevos excretados a menudo no están inmediatamente infectivos: requieren un periodo de embriogénesis en ambiente (temperatura, humedad y oxígeno adecuados) para que se forme la larva infectiva (ejemplo: huevos de *Ascaris* tardan días–semanas en convertirse en infectivos según condiciones).

- La eclosión (hatching) puede estar regulada por señales químicas del huésped: por ejemplo, trabajos recientes muestran que el microambiente gástrico (pH, quimotripsina/amilasas, etc.) influye en el desencadenamiento de la eclosión de huevos de *Ascaris* y en el inicio de infección. Esto tiene implicaciones para modelos

experimentales y para el desarrollo de estrategias que interfieran con la eclosión. (Sohn & Chai, 2024).

#### **2.2.12.5. Resistencia ambiental y persistencia (estabilidad e infectividad).**

Alta resistencia: muchos huevos (sobre todo *Ascaris* y *Trichuris*) muestran una notable persistencia en suelos y residuos — pueden permanecer viables meses a años en condiciones favorables (varía con humedad, temperatura y radiación UV). Esto convierte a los huevos en reservorios ambientales importantes.

Factores que aumentan supervivencia: capas lipídicas + quitina, temperatura templada-fría (en climas templados disminuye la mortalidad relativa), humedad moderada y protección dentro de materia orgánica (heces, lodo) que atenúa efectos desecantes y UV.

Variabilidad entre especies: huevos operculados de tremátodos y algunos cestodos tienen distinta resistencia y requieren tratamientos distintos en procesos de eliminación; *Schistosoma* produce huevos con capacidades de evasión inmunológica que le permiten sobrevivir el tiempo suficiente para madurar el miracidio. (Mahapatra et al., 2022).

#### **2.2.12.6. Interacción inmunológica y efectos patogénicos asociados al huevo.**

Huevos como principales inductores de patología (Ejemplo: schistosomiasis): en *Schistosoma*, los huevos son la principal causa de inflamación crónica: secretan antígenos que modulan la respuesta inmune, inducen granulomas y determinan la morbilidad (daño intestinal/hepático o vesical según especie). Esto muestra que la biología del huevo no es sólo de transmisión: es el principal mediador inmunopatológico.

- Además, exoantígenos y vesículas liberadas por huevos (o por el miracidio) interactúan con células inmunes, modulando el balance entre tolerancia y daño inflamatorio; esto abre rutas de estudio para vacunas y terapias inmunomoduladoras. (Sohn y Chai, 2024).

#### **2.2.12.7. Viabilidad, ensayos de infectividad y marcadores de viabilidad.**

Pruebas de viabilidad tradicionales: incubación y observación de embriogénesis/eclosión en condiciones controladas; examen microscópico de movimiento larvario tras eclosión.

Marcadores moleculares emergentes: ensayos basados en ARN mensajero (más efímeros que ADN) o en integridad de membrana usando tinciones que discriminen células vivas/muertas pueden dar estimaciones de viabilidad más precisas, pero están en desarrollo para uso rutinario. (Ward et al., 2022).

#### **2.2.12.8. Inactivación y tratamiento (aguas residuales, lodos, seguridad alimentaria).**

Resistencia a desinfección convencional: huevos de *Ascaris* y *Trichuris* son notoriamente resistentes a desinfectantes comunes (p. ej. cloro a concentraciones usuarias) y a condiciones ambientales adversas; por ello, los procesos de tratamiento de lodos/aguas deben incluir etapas físicas (calor, desecación prolongada) o procesos más intensivos (compostaje térmico, filtración + desinfección) para reducir el riesgo.

Efectividad de tratamientos: estudios muestran que tratamientos térmicos sostenidos (temperaturas de compostaje >50–60 °C por tiempo suficiente) y procesos combinados reducen viabilidad; tecnologías de filtración y lechos presurizados pueden remover huevos pero la destrucción absoluta requiere tratamiento térmico o químico específico. (Mahapatra et al., 2022).

#### **2.2.12.9. Importancia microbiológica.**

Los huevos de helmintos constituyen microambientes cerrados en los que ocurren procesos de embriogénesis regulados por factores ambientales. Su resistencia en suelo y agua los convierte en indicadores de contaminación fecal, con implicaciones en salud pública y

veterinaria (Mahapatra et al., 2022). Además, sus cubiertas externas contienen antígenos útiles para el desarrollo de métodos inmunodiagnósticos y potenciales candidatos vacunales (Ward et al., 2022).

**2.2.12.10. Importancia sanitaria y criterios de seguridad (resumen).**

La presencia de HVH en agua, suelo o biosólidos indica riesgo de transmisión (geohelmintiasis) y se usa como indicador de seguridad para reúso agrícola y manejo de biosólidos. Organizaciones internacionales (WHO/PAHO) recomiendan medidas de saneamiento, tratamiento y desparasitación masiva en áreas de alta prevalencia. (Mahapatra et al., 2022).

**2.2.13. *Escherichia coli***

Según Anderson, et al. (2023).

**2.2.13.1. Clasificación Taxonómica.**

**Tabla 2**

*Taxonomía de Escherichia coli.*

|         |                         |
|---------|-------------------------|
| Dominio | Bacteria                |
| Filo    | Proteobacteria          |
| Clase   | Gammaproteobacteria     |
| Orden   | Enterobacterales        |
| Familia | Enterobacteriaceae      |
| Género  | <i>Escherichia</i>      |
| Especie | <i>Escherichia coli</i> |

**2.2.13.2. Características Morfológicas y Fisiológicas.**

- Bacilo Gram-negativo, no esporulante, anaerobio facultativo.

- Tamaño aproximado: 1–3  $\mu\text{m}$  de longitud.
- Fermenta glucosa con producción de gas y ácido.
- Catalasa positivo, oxidasa negativo.
- Algunas cepas fermentan lactosa (*E. coli* típicamente sí lo hace).

#### **2.2.13.3. Genética y Factores de Virulencia**

Las cepas patogénicas de *E. coli* poseen genes de virulencia asociados a toxinas (como stx1, stx2, eaeA), adhesinas, sistemas de adquisición de hierro, y factores de invasión. El análisis de genomas completos muestra alta diversidad genética y presencia de genes de resistencia a antibióticos (p.24).

#### **2.2.13.4. Resistencia Antimicrobiana.**

*E. coli* aislada de ambientes como aguas residuales presenta con frecuencia resistencia a antibióticos  $\beta$ -lactámicos, tetraciclinas, y sulfonamidas. La presencia de integrones facilita la resistencia horizontal y la persistencia en ambientes contaminados. (p.27)

#### **2.2.13.5. Relevancia Microbiológica.**

*E. coli* es ampliamente utilizada como indicador de contaminación fecal. Algunas cepas son agentes patógenos causantes de infecciones intestinales y extraintestinales, mientras que otras permanecen como comensales.

Su capacidad de albergar genes de resistencia la convierte en un riesgo emergente en salud pública (p.28).

#### **2.2.14. *Enterobacter aerogenes***

Según Jari Intra, et al. (2023).

#### 2.2.14.1. Clasificación Taxonómica.

**Tabla 3**

*Taxonomía de Enterobacter aerogenes.*

|         |                               |
|---------|-------------------------------|
| Dominio | Bacteria                      |
| Filo    | Proteobacteria                |
| Clase   | Gammaproteobacteria           |
| Orden   | Enterobacterales              |
| Familia | Enterobacteriaceae            |
| Género  | <i>Enterobacter aerogenes</i> |
| Especie | <i>Enterobacter aerogenes</i> |

#### 2.2.14.2. Características Morfológicas y Fisiológicas.

- Bacilo Gram-negativo, anaerobio facultativo.
- Tamaño aproximado: 1–3  $\mu\text{m}$ .
- Catalasa positivo, oxidasa negativo.
- Indol negativo, citrato positivo.
- Movilidad variable.

#### 2.2.14.3. Genética y Factores de Virulencia.

*Enterobacter aerogenes* presenta genes asociados con adhesinas, sistemas de adquisición de hierro, resistencia a metales pesados y factores de virulencia propios de infecciones sanguíneas. La presencia de  $\beta$ -lactamasas y genes de resistencia la hacen altamente relevante en entornos hospitalarios (p.15).

#### 2.2.14.4. Resistencia Antimicrobiana.

*Enterobacter aerogenes* presenta resistencia inducible a múltiples antibióticos, incluyendo  $\beta$ -lactámicos, aminoglucósidos y fluoroquinolonas. Es considerada una bacteria oportunista multirresistente, especialmente asociada a infecciones nosocomiales (p.17).

#### **2.2.14.5. Relevancia Microbiológica.**

La importancia de *Enterobacter aerogenes* radica en su papel como agente de infecciones intrahospitalarias y en su capacidad de resistencia a antimicrobianos. Representa un reservorio genético de resistencia y se asocia a cuadros graves de sepsis, neumonía y bacteriemias en pacientes inmunocomprometidos (p.18).

#### **2.2.15. Óxido de calcio (CaO)**

##### **2.2.14.6. Granulometría del óxido de calcio (CaO).**

La granulometría del óxido de calcio es la distribución estadística del tamaño de las partículas de CaO en una muestra (por ejemplo, D10, D50, D90 o porcentaje en mallas/ $\mu\text{m}$ ). Esta distribución describe qué fracción del material es ultrafina, fina, media o gruesa y condiciona propiedades funcionales críticas: área superficial específica, velocidad de hidratación (reactividad), comportamiento como polvo (inhalabilidad), flujo y mezclabilidad en matrices sólidas o líquidas. En aplicaciones industriales y de enmienda de suelos la granulometría determina la velocidad de actuación y las condiciones de manejo y almacenamiento (Yuvalı et al., 2024).

##### **2.2.14.7. Características fisicoquímicas del óxido de calcio (CaO).**

Estado y apariencia: sólido cristalino, generalmente blanco o blanco-grisáceo; disponible como polvo fino, granulados o en bloques.

Menciona (Rashad, 2023):

- Composición química y pureza: principal componente CaO. La calidad industrial se caracteriza por %CaO (90–98% en cal viva comercial) y por la presencia de impurezas como  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{MgO}$ .

- Reactividad con agua (hidrólisis): el  $\text{CaO}$  reacciona exotérmicamente con agua formando  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . La velocidad de esa reacción aumenta con el área superficial; partículas más finas  $\rightarrow$  mayor velocidad de hidratación y calor liberado.
- Propiedades físicas: densidad aparente y real dependen de la granulometría y compactación; las condiciones de calcinación influyen en porosidad y superficie específica.
- Higroscopicidad: el  $\text{CaO}$  fino tiende a absorber humedad del aire, transformándose en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Esto afecta la estabilidad de almacenamiento, recomendándose envases herméticos.
- Riesgos: polvo irritante para piel, ojos y vías respiratorias; la hidrólisis libera calor, lo que exige equipo de protección personal.
- Efectos tecnológicos: aplicaciones que requieren alta reactividad usan  $\text{CaO}$  finamente dividido; para estabilización de suelos se usan granulometrías más gruesas para liberación controlada. (p.35).

#### **2.2.16. Decreto Supremo N°015-2017-MVCS**

El 05 de abril del 2017 mediante “Resolución Ministerial N°128-2017-Vivienda” donde se aprobaron las condiciones mínimas para la gestión de los lodos y donde se dará lugar a su disposición final, el proceso de manejo de lodos se da por las etapas de recolección, almacenamiento, tratamiento, reaprovechamiento, transporte y disposición final, para las industrias este manejo está dispuesto en su Instrumento de Gestión Ambiental. (MVCS, 2017)

Mediante “Decreto Supremo N°015-2017-Vivienda se aprobó el Reglamento de Lodos Generados en Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales”, en la cual se habilita de mezclar

lodos con sustratos ser usados en el mejoramiento de suelos (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2017).

### **2.2.17. Alternativas de uso de los lodos residuales provenientes de aguas residuales domésticas**

En el proceso de tratamiento de las aguas residuales se generan subproductos conocidos como lodos residuales, los cuales varían sus características dependiendo del agua tratada.

Los lodos residuales requieren tratamientos con el fin de controlar olores, disminuir organismos patógenos y el contenido de humedad (Castillo et al., 2020).

Según el Decreto 1287 de 2014 Colombia, los lodos residuales según sus características físicoquímicas y microbiológicas se pueden clasificar en Categoría A o B como muestra la tabla 4 y podrían destinarse para los siguientes usos:

**Tabla 4**

*Categorías y alternativas de uso del lodo residual PTAR.*

| Categoría A                                                                                                                                                                                                                                                                | Categoría B                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zonas verdes (cementerios, separadores viales, campos de golf, lotes vacíos, etc.</li> <li>• Producto de áreas privadas (jardines, antejardines, patios, plantas ornamentales y arborización).</li> <li>• Agricultura.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Agricultura</li> <li>• Plantaciones forestales.</li> <li>• Recuperación, restauración o mejoramiento de suelos degradados.</li> <li>• Insumo en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes orgánicos o productos para el suelo.</li> <li>• Zonas verdes (cementerios, separadores viales, campos de golf, lotes vacíos, etc.</li> </ul> |

*Nota:* Esta tabla muestra la categorización y posibles reúsos del lodo residual según la normativa colombiana. Fuente. Adaptado de (Gualoto, 2016; Díaz, Veliz, Eliet y Venta, 2015).

## **2.3. Definición de términos básicos**

### **2.3.1. Huevos de helmintos**

Los huevos de helmintos representan una estructura fundamental en la transmisión y el ciclo biológico de estos parásitos. Desde una perspectiva microbiológica, su clasificación y análisis permiten comprender aspectos relacionados con la resistencia ambiental, la embriogénesis y la respuesta inmunológica del hospedero. (Ryoo et al., 2023).

### **2.3.2. *Escherichia coli***

*Escherichia coli* (*E. coli*) es un bacilo Gram-negativo perteneciente a la familia *Enterobacteriaceae*, con gran relevancia clínica, ambiental y alimentaria. Es un microorganismo indicador de contaminación fecal y puede comportarse como comensal o patógeno, dependiendo de la cepa.

### **2.3.3. *Enterobacter aerogenes***

*Enterobacter aerogenes* es una bacteria Gram-negativa, bacilar, móvil y anaerobia facultativa de la familia *Enterobacteriaceae*, oportunista en entornos hospitalarios, capaz de infectar vías respiratorias, urinarias y causar bacteriemias (Intra, et al. 2023).

### **2.3.4. Óxido de calcio**

Es un óxido básico inorgánico formado por calcio y oxígeno. Se obtiene principalmente por la calcinación térmica de la piedra caliza (carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$ ), proceso en el cual se libera dióxido de carbono y queda  $\text{CaO}$ . En su forma comercial es un polvo blanco que reacciona vigorosamente con agua para formar hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) y se usa ampliamente en la industria (cemento y siderurgia), agricultura (encalado), tratamiento de efluentes y procesos metalúrgicos por sus propiedades alcalinas y de secado (Zárate, 2022).

### **2.3.5. pH**

El pH (potencial o potencia de hidrógeno) es una magnitud adimensional que indica el grado de acidez o alcalinidad de una disolución acuosa; se define como el logaritmo negativo en base 10 de la actividad (aproximada por la concentración) de iones hidronio ( $H^+$ ) (Velázquez, 2022).

### **2.3.6. Temperatura**

Es una magnitud física que cuantifica la energía cinética media de las partículas (átomos y moléculas) de un sistema; en términos prácticos, es la medida de cuán “caliente” o “frío” está un cuerpo o medio. En aplicaciones ambientales (aire, agua, suelos) la temperatura condiciona la química (por ejemplo, solubilidad y velocidad de reacciones), la dinámica biológica (metabolismo, distribuciones de especies) y los indicadores climáticos regionales. Se expresa en unidades del Sistema Internacional (Kelvin, K) o en grados Celsius ( $^{\circ}C$ ) (Plaza, 2023).

### **2.3.7. Remoción**

El término remoción de patógenos en el contexto de aguas residuales no significa necesariamente destrucción, sino la inactivación (eliminación real) de los patógenos que ocurre en procesos posteriores de desinfección o estabilización (cloración, estabilización alcalina con cal, ozonización, radiación UV, digestión anaerobia, compostaje, tratamiento térmico, etc.) (Metcalf y Eddy, 2014).

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Localización del estudio**

El trabajo de investigación se llevó a cabo en el lecho de secados de la planta de tratamiento de agua residual (PTAR) de Celendín ubicado al norte de la ciudad a una altitud de 2605 msnm; distrito Celendín, provincia Celendín, departamento Cajamarca; cuenta con un área aproximada de 3 hectáreas.

Está ubicada al norte de la provincia con coordenadas UTM: Este: 815435 m, Norte: 9241975 m, en la zona norte de la ciudad de Celendín.

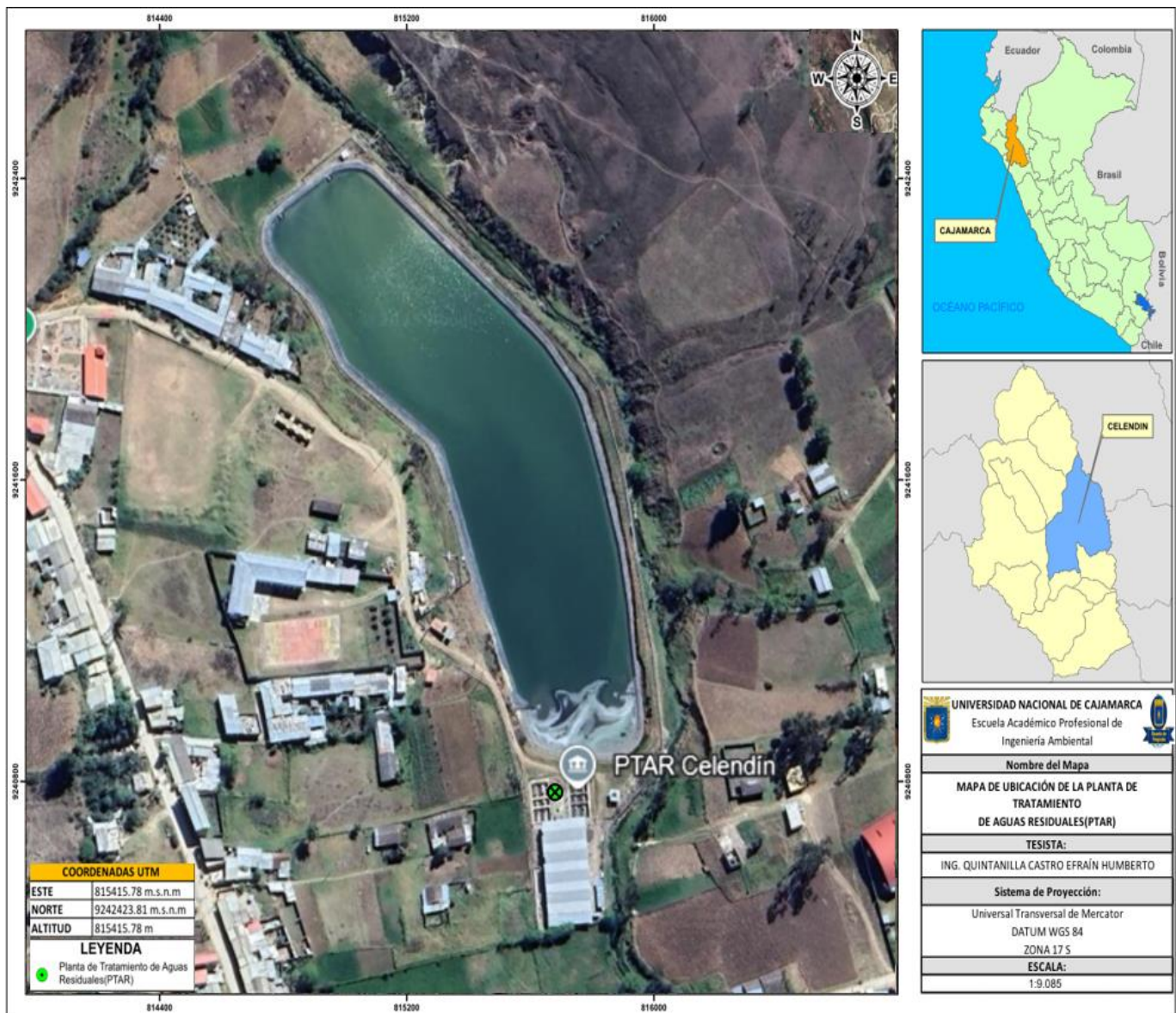
La planta de tratamiento de aguas residuales se encuentra ubicada en el barrio de Pallac, a 2.5 km desde la plaza de armas de la ciudad, para llegar a dicho lugar se pasa por la Institución Educativa Primaria de Pallac y el parque Pachacútec (Figura 1).

Las muestras fueron acondicionadas en el Laboratorio de biología de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental de la Filial Celendín de la Universidad Nacional de Cajamarca.

Los análisis de laboratorio se desarrollaron en el Laboratorio de Microbiología y Bioquímica BioMic SRL, ubicado en la ciudad de Cajamarca.

**Figura 1**

*Ubicación de la planta de tratamiento de agua residual ciudad de Celendín.*



*Nota:* Ubicación de la PTAR donde se generan los lodos residuales deshidratados y su ubicación al norte respecto a la zona urbana de la ciudad de Celendín.

### 3.2. Descripción de la metodología

Se llevaron a cabo diez (10) repeticiones con intervalos de quince (15) días durante cinco (5) meses entre febrero y junio de 2024, Los tratamientos aplicados tuvieron las siguientes

proporciones:  $T_0$  (testigo): 0 g peso de óxido de calcio,  $T_1$ : 10 g peso de óxido de calcio,  $T_2$ : 50 g peso de óxido de calcio y  $T_3$ : 100 g peso de óxido de calcio, que se aplicaron en 500 g de lodo residual deshidratado respectivamente.

### **3.2.1. Identificación del punto de monitoreo**

Se procedió a identificar los diversos procesos de tratamiento en la PTAR Celendín e identificar el tipo de lodo residual deshidratado generado en las diversas etapas de la misma, y se tuvo en cuenta el tratamiento secundario conformado por dos reactores de tratamiento con el sistema de Reactores Anaeróbicos de Flujo Ascendente (RAFA). Los lodos residuales provenientes de las dos reactores de tratamiento con el sistema de Reactores Anaeróbicos de Flujo Ascendente (RAFA) producen mensualmente un aproximado de 15 – 20 toneladas de lodo residual deshidratado pudiendo variar en función al caudal de tratamiento y las condiciones de operación de la PTAR.

### **Figura 2**

*Reactor anaeróbico de flujo ascendente de la planta de tratamiento de agua residual de Celendín.*



*Nota:* La figura muestra los reactores anaeróbicos de flujo ascendente (RAFA), de donde fueron extraídos los lodos residuales que van al lecho de secados.

### **Figura 3**

*Lecho de secados en la planta de tratamiento de agua residual Celendín.*



*Nota:* Lechos de secado de la PTAR Celendín, donde se deshidratan los lodos residuales provenientes de los RAFA.

#### **3.2.2. Muestreo del lodo residual deshidratado**

Una vez que los lodos residuales son evacuados desde los RAFA hacia los lechos de secado en donde permanecieron por un lapso de 15 – 20 días, donde reducen considerablemente su nivel de humedad; se procede a la toma de las muestras, para que exista representatividad, la muestra de lodo residual deshidratado estuvo compuesta de varias submuestras de igual tamaño, en este caso se tomaron muestras de 1 kg en seis puntos distintos del lecho secados equidistantemente, obteniéndose un total de 6 kilogramos; de acuerdo a la Guía para Muestreo de Suelos (MINAM, 2014).

#### **Figura 4**

*Muestreo del lodo residual deshidratado.*



*Nota:* Muestrea el lodo residual deshidratado proveniente de los RAFA.

#### **3.2.3. Acondicionamiento de las muestras de lodo residual deshidratado**

Una vez que las muestras de lodo residual deshidratado fueron extraídas de la PTAR – lecho de secados, se trasladaron hacia el Laboratorio de Biología de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental de la Filial Celendín de la Universidad Nacional de Cajamarca, para acondicionarlos convenientemente de la siguiente manera: en 4 contenedores de plástico se colocaron 500 gramos en peso de lodo residual deshidratado a cada uno, rotulados cada uno ( $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$ ), a los cuales se les agregó los tratamientos correspondientes bajo la siguiente distribución:  $T_0$ : 0 g peso de óxido de calcio,  $T_1$ : 10 g peso de óxido de calcio,  $T_2$ : 50 g peso de óxido de calcio y  $T_3$ : 100 g peso de óxido de calcio; de acuerdo a la Guía para Muestreo de Suelos (MINAM, 2014).

**Tabla 5**

*Detalle de tratamientos aplicados.*

|                                                                         | Tratamientos   |                |                |                |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                                                         | T <sub>0</sub> | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> |
| Proporción (g de óxido de calcio / 500 g de lodo residual deshidratado) | 0              | 10             | 50             | 100            |
| Porcentaje (% de óxido de calcio / 500 g de lodo residual deshidratado) | 0              | 2              | 10             | 20             |

*Nota:* Equivalencia entre proporciones y porcentajes de óxido de calcio aplicadas en cada tratamiento aplicado.

**Figura 5**

*Distribución de los tratamientos para lodo residual deshidratado.*



*Nota:* Contenedores donde se acondicionó el lodo residual deshidratado de la PTAR y se aplicaron los tratamientos correspondientes.

### **3.2.4. Medición de parámetros de pH y temperatura**

Una vez aplicados los tratamientos correspondientes el primer día, se procedió a la medición de los parámetros de campo: pH y temperatura con la aplicación de los métodos estándares de laboratorio: método gravimétrico, método electrométrico y método termométrico; esto con la finalidad de conocer el posible efecto de estos parámetros en la acción del óxido de calcio en los lodos residuales deshidratados y los elementos a medir.

En tal sentido se consideraron dos mediciones, una en el primer día de la aplicación del óxido de calcio y la otra después de cinco días de aplicación de los tratamientos; para cada uno de los cuatro contenedores con sus respectivos tratamientos.

#### **Figura 6**

*Medición de pH y temperatura del lodo residual deshidratado.*



*Nota:* Medición de valores para los parámetros: pH y temperatura el 1° y 5° día de la aplicación de los tratamientos con óxido de calcio.

### **3.2.5. Análisis microbiológico**

Después de haber obtenido los datos de los parámetros de pH y temperatura, se procedió a extraer 250 gramos en peso de lodo residual deshidratado de cada contenedor (4 unidades) y colocarlo en contenedores de vidrio rotulados y esterilizados previamente (4 unidades), luego se sellaron con cinta masking tape para poder así evitar que se contaminen las muestras, cada contenedor se colocó dentro del cooler y se trasladó al laboratorio especializado BioMic SRL de la ciudad de Cajamarca,

#### **3.2.5.1. Procesamiento de la muestra para *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes*.**

##### **A. Procesamiento de la muestra**

- Se pesó 10 g de la muestra lodo residual deshidratado y suspender en 90 mL de agua peptonada tamponada para obtener una dilución de 10<sup>-1</sup>.
- Se realizó diluciones seriadas 10<sup>-2</sup>, 10<sup>-3</sup> hasta 10<sup>-6</sup> transfiriendo 1 mL de la dilución anterior a 9 mL agua peptonada tamponada.

##### **B. Estabilización de la muestra**

- Con ayuda de una solución 1 N de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> se redujo el pH de la muestra hasta un pH de 7 – 7.5, esto se realizó para que no haya interferencia con los indicadores de pH de los medios de cultivo.

##### **C. Aislamiento de las bacterias**

- Se sembró por extensión 100 µL de cada dilución en placas de agar MacConkey y agar EMB.
- Se inoculó 1 mL de cada dilución en las placas Petrifilm para *E. coli*, extender uniformemente el inóculo en las placas Petri.

- Se incubó a 37 °C durante 24 - 48 h.

#### **D. Confirmación de *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes***

- Se seleccionaron las colonias características de las placas con presencia del indicador color rosado en agar MacConkey: colonias lactosa positivas (rosadas).
- En agar EMB: colonias de color oscuro o con brillo verdoso metálico (indicativo de *Escherichia coli*).
- Colonias mucosas, color oscuro el centro y bordes claros, sin brillo metálico (indicativo de *Enterobacter aerogenes*).
- Se realizó tinción Gram para confirmar bacterias en forma de bacilos Gram Negativos.

#### **E. Pruebas bioquímicas**

- A partir de una colonia aislada pura se sembró en los siguientes medios: Citrato de Simmons, TSI, LIA; MIO, MR-VP.
- *E. coli*: Indol (+), MR (+), VP (-), LIA (descarboxilación de lisina (+)), MIO (descarboxilación de ornitrina (+)), Citrato (-)
- *E. aerogenes*: Citrato (+), VP (+), MR (-), LIA (-).

#### **F. Recuento en placas: cuantificación**

- Se contaron las colonias características en placas con las diluciones adecuadas (30 – 300 colonias). Se expresaron los resultados en UFC/g.

$$UFC/g = \frac{\text{Número de colonias}}{\text{Volumen sembrado (mL)} \times \text{Dilución}}$$

**Nota:** Se emplearon controles positivos de cada cepa bacteriana.

### **3.2.5.2. Procesamiento de la muestra para huevos viables de helmintos.**

#### ***A. Pesado de la muestra:***

- Se pesó exactamente 10 gramos lodo residual deshidratado de la muestra utilizando una balanza.

#### ***B. Preparación para sedimentación:***

- Se transfirió la muestra a una copa cónica de sedimentación.
- Se añadió agua destilada hasta el borde de la copa.

#### ***C. Sedimentación:***

- Se dejó reposar la copa durante al menos 6 horas para permitir que los huevos de helmintos se depositen en el fondo.

#### ***D. Conservación con formol:***

- Después de completar la sedimentación, se retiró el sobrenadante con cuidado para no perturbar el sedimento.
- Se añadió una cantidad suficiente de formol al 10 % al sedimento para conservarlo.
- Se mezcló suavemente para garantizar una conservación homogénea.

#### ***E. Recolección del sedimento:***

- Se extrajo cuidadosamente una muestra del sedimento conservado con una pipeta Pasteur.
- Se transfirió una gota del sedimento a un portaobjetos y agregar 0.6 mL de Lugol al 1 % posteriormente se cubrió con un cubreobjetos.
- Se leyó la totalidad del sedimento que corresponde a los 10 gramos de muestra.

#### ***F. Observación microscópica del sedimento de lodo residual deshidratado:***

- Se examinó el sedimento bajo un microscopio utilizando lentes de 40x y 100x.
- Se contó y registró los huevos que no presenten daños.

**Nota:** Para expresar los resultados en huevos/gramo se dividió el total de huevos por la masa inicial expresada en gramos, después de cinco días de la aplicación del óxido de calcio.

#### **Figura 7**

*Contenedores para análisis microbiológico.*



#### **Figura 8**

*Análisis para huevos de helmintos.*



*Nota:* Equipo de conteo de huevos de helmintos.

Los métodos utilizados para los análisis microbiológicos fueron los siguientes: Recuento en placa. Identificación de especie por pruebas bioquímicas. para *Escherichia coli* y *Enterobacter*

*aerogenes* (Identificación y Recuento): Recuento en placa - Identificación de especie por pruebas bioquímicas y para huevos de helmintos (Recuento): Método de sedimentación rápida (TSR) - Concentración.

Se consideran huevos viables, los huevos que presentan una estructura intacta, osea, que no muestren signos de deterioro o ruptura, en relación al estado larvario solo se reportaron huevos, no se consideró en el reporte estados parasitarios posteriores a la eclosión. el pH alcalino puede desnaturalizar la cubierta de los huevos, pero su efectividad puede estar ligada al método de aplicación o al tiempo de aplicación, también depende mucho de las cantidades de óxido de calcio que se apliquen, normalmente la viabilidad de los huevos depende también de la humedad y otros factores del entorno. Los huevos no viables, al tener daños en su estructura no pueden cumplir su actividad biológica y mueren. En el caso de los resultados reportados como valor 0 HVH/4 g de lodo residual deshidratado, se puede considerar que en esa muestra todos los huevos de helmintos han sido eliminados o inactivados, pero si el valor es mayor a 0 HVH/4 g de lodo residual deshidratado, quiere decir que hay presencia de huevos viables.

**Tabla 6**

*Métodos y límites para parámetros estudiados.*

| Parámetro                     | Límite de cuantificación | Método                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Escherichia coli</i>       | 1 NMP/g                  | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9222D: Standard Total Coliform Membrane Filter Procedure. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.                     |
| <i>Enterobacter aerogenes</i> | 1 NMP/g                  | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9221: Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. |
| Huevos de helmintos           | 1 HVH/4 g                | Adaptación del método EPA. (2003). "Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge." United States Environmental Protection Agency, EPA/625/R-92/013. Quantification of viable helminth eggs in samples of sewage sludge.                         |

*Nota:* Métodos utilizados para la identificación de *Escherichia coli*, *Enterobacter aerogenes* y huevos de helmintos y los límites establecidos por el Decreto Supremo N° 015-2017 - MVCS.

## Figura 9

*Análisis para Escherichia coli y Enterobacter aerogenes.*



*Nota:* Identificación de *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes* con sus resultados expresados en unidades de NMP/g.

Después de la realización de los análisis microbiológicos respectivos el laboratorio se encargó de emitir los informes técnicos correspondientes de acuerdo al programa de monitoreo establecido previamente de forma quincenal durante los cinco meses de estudio.

### **3.2.6. Presentación de los resultados**

Toda la información presentada está especificada en tablas y figuras para detallar los resultados obtenidos en los monitoreos expresados en los informes técnicos emitidos por el laboratorio BioMic SRL Cajamarca a cargo del análisis.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Análisis microbiológico

Los resultados obtenidos con análisis microbiológicos para huevos de helmintos y *Escherichia coli*, fueron comparados con la normativa nacional vigente Decreto Supremo N° 015-2017 - MVCS, para el caso de *Enterobacter aerogenes* no se cuenta con normativa nacional que especifique el límite o valor promedio para referencia, cumpliendo de este modo con el objetivo general del presente trabajo de investigación.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos durante el estudio de investigación desarrollados durante los cinco meses de monitoreo:

##### 4.1.1. Resultados de huevos de helmintos

En la tabla 09 y figura 10 se muestran los valores obtenidos después del análisis microbiológico expresados en unidades de huevos viables de helmintos (HVH) N° de huevos/4 g de lodo residual deshidratado, que contiene la muestra de lodo residual deshidratado sin aplicar el tratamiento con óxido de calcio T<sub>0</sub> (0 gramos de óxido de calcio - muestra testigo) y los otros tres tratamientos con aplicación de óxido de calcio (T<sub>1</sub>: 10 gramos de óxido de calcio, T<sub>2</sub>: 50 gramos de óxido de calcio y T<sub>3</sub>: 100 gramos) respectivamente, aplicados respectivamente en 500 g de lodo residual deshidratado.

Se aprecia una tendencia de disminución considerable de los valores promedio obtenidos con la aplicación de los tratamientos de forma progresiva, teniendo como resultado en unidades de huevos viables de helmintos (HVH), para el  $T_0$ : 258,  $T_1$ : 80,  $T_2$ : 14 y  $T_3$ : 0, llegando a obtener una remoción total de este parámetro en el tercer tratamiento ( $T_3$ : 100 g de óxido de calcio en 500 gramos de lodo residual deshidratado) en las diez repeticiones realizadas.

El tratamiento alcalino con óxido de calcio representa una de las estrategias más utilizadas para la inactivación de patógenos presentes en lodos residuales, incluyendo huevos de helmintos, considerados los indicadores parasitológicos más resistentes. En este estudio, tras cinco días de contacto a una temperatura promedio de 20 °C y un pH promedio de 13, se evidencian efectos físicos, químicos y microbiológicos que comprometen de manera significativa la viabilidad de estos organismos.

En el plano físico, el pH extremo deteriora progresivamente las cubiertas externas de los huevos de helmintos, compuestas por capas lipídicas y quitinosas altamente resistentes. La exposición sostenida a condiciones alcalinas induce fisuras y debilitamiento de la membrana protectora, lo que disminuye la capacidad de los huevos para mantener su integridad estructural. Este efecto concuerda con lo planteado por Sánchez et al. (2024), quienes reportaron que el aumento del pH mediante la adición de cal produce un ambiente hostil para la supervivencia de diversos microorganismos.

Desde el punto de vista químico, la alcalinización extrema desencadena reacciones de hidrólisis que afectan proteínas estructurales y enzimas relacionadas con el metabolismo del embrión. Huanca et al. (2022) demostraron que tratamientos con concentraciones de óxido de calcio entre 8 % y 12 % logran mantener pH mayores a 12 por más de 72 horas, condición que asegura la desnaturalización de moléculas esenciales y, por ende, la pérdida de viabilidad de

patógenos. A pesar de que la temperatura registrada en el presente análisis fue moderada (20 °C), la acción combinada del óxido de calcio con el pH promedio 13 es suficiente para inducir la inactivación larvaria.

En el ámbito microbiológico, el daño sobre los huevos de helmintos se manifiesta en la pérdida de la capacidad de eclosión y en la interrupción del ciclo infectivo. Ayala et al. (2022) reportaron que la aplicación de óxido de calcio en porcentajes de 20 % y 30 % permitió clasificar lodos residuales deshidratados como clase B y A respectivamente. De manera similar, Cárdenas y Molina (2022) señalaron que, a pesar de la eficacia de tratamientos convencionales como la digestión anaerobia, algunos huevos de helmintos permanecen activos, lo que refuerza la importancia del tratamiento alcalino como alternativa eficaz.

La normativa peruana D.S. N° 015-2017-MVCS establece parámetros microbiológicos estrictos para la disposición y reúso de lodo residual deshidratado, incluyendo límites máximos permisibles de huevos de helmintos viables. Bajo las condiciones evaluadas, el uso de óxido de calcio se alinea con estos requerimientos al asegurar una reducción significativa de estos parásitos, lo cual es indispensable para garantizar la protección de la salud pública y el aprovechamiento seguro del lodo residual deshidratado en actividades agrícolas.

Los efectos del óxido de calcio tras cinco días de exposición a pH promedio 13 y 20 °C en promedio incluyen: daño físico en las cubiertas externas de los huevos de helmintos, degradación química de proteínas y enzimas clave, y pérdida de viabilidad microbiológica que impide la eclosión larvaria. Estos hallazgos refuerzan la eficacia del tratamiento alcalino como técnica de higienización del lodo residual deshidratado.

**Tabla 7**

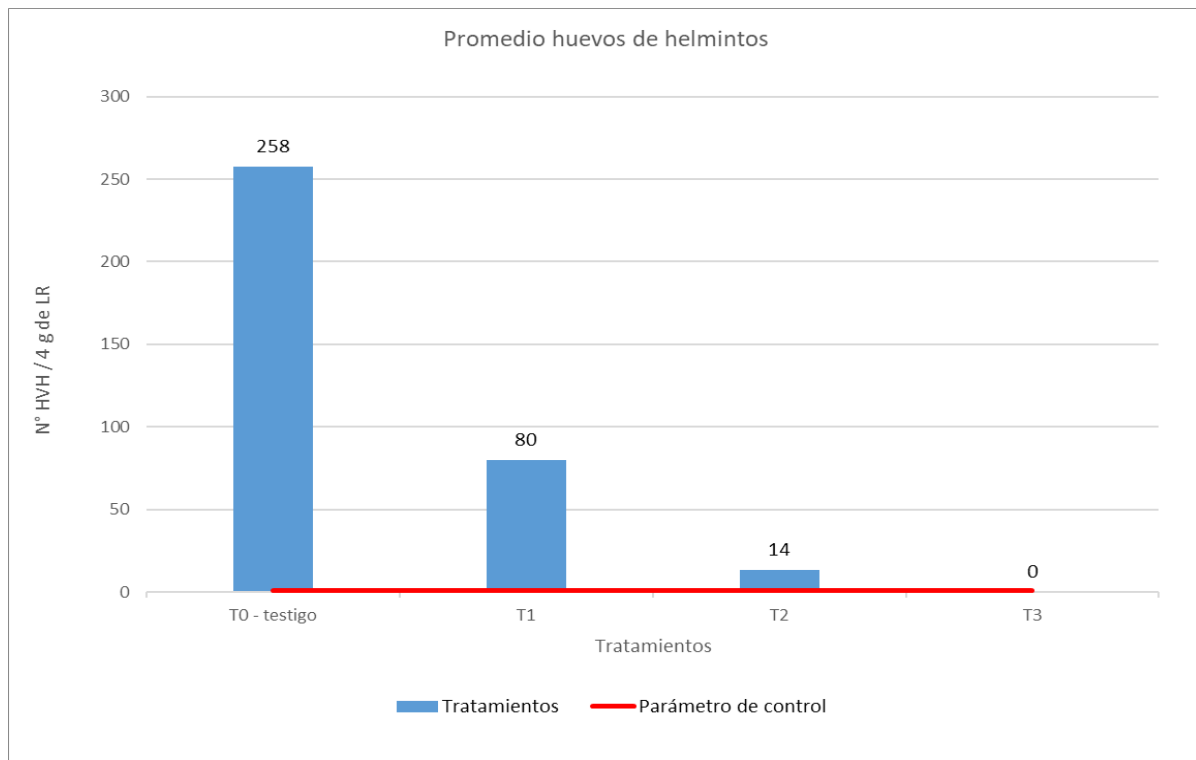
*Huevos viables de helmintos (HVH/4 g de lodo residual deshidratado).*

| Repetición | Fecha      | Tratamientos             |                |                |                | pH                          |                    |                    |                    |
|------------|------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|            |            | T <sub>0</sub> - testigo | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | pH -T <sub>0</sub> -testigo | pH -T <sub>1</sub> | pH -T <sub>2</sub> | pH -T <sub>3</sub> |
| 1°         | 9/02/2024  | 270                      | 80             | 2              | 0              | 7.69                        | 8.03               | 12.36              | 12.50              |
| 2°         | 21/02/2024 | 197                      | 58             | 6              | 0              | 7.91                        | 7.96               | 12.48              | 12.51              |
| 3°         | 6/03/2024  | 256                      | 88             | 10             | 0              | 7.87                        | 8.63               | 12.88              | 12.95              |
| 4°         | 20/03/2024 | 350                      | 80             | 14             | 0              | 8.42                        | 8.49               | 12.37              | 12.52              |
| 5°         | 4/04/2024  | 270                      | 72             | 12             | 0              | 7.31                        | 7.80               | 12.29              | 12.58              |
| 6°         | 17/04/2024 | 246                      | 98             | 16             | 0              | 8.16                        | 8.72               | 12.41              | 12.54              |
| 7°         | 3/05/2024  | 272                      | 72             | 20             | 0              | 7.23                        | 10.10              | 12.52              | 12.55              |
| 8°         | 21/05/2024 | 264                      | 79             | 24             | 0              | 7.59                        | 7.92               | 11.68              | 12.48              |
| 9°         | 5/06/2024  | 253                      | 86             | 16             | 0              | 7.76                        | 8.19               | 12.35              | 12.44              |
| 10°        | 20/06/2024 | 201                      | 85             | 16             | 0              | 7.89                        | 8.20               | 12.35              | 12.46              |
| Promedio   |            | 258                      | 80             | 14             | 0              | 7.78                        | 8.40               | 12.37              | 12.55              |

*Nota:* La tabla nos muestra los valores de huevos viables de helmintos, para los cuatro tratamientos realizados en diez repeticiones en unidades de huevos viables de helmintos HVH/4 g de lodo residual deshidratado.

**Figura 10**

*Promedio del número de huevos viables de helmintos (HVH/4 g de lodo residual deshidratado).*



*Nota:* En la figura se puede apreciar el promedio total de huevos de helmintos para los cuatro tratamientos analizados al quinto día de aplicado el óxido de calcio.

En el análisis de los resultados presentados en la Tabla 7 y la Figura 10, se observa claramente que la adición de óxido de calcio tiene un efecto notable en la reducción de huevos viables de helmintos (HVH) en los lodos residuales secundarios. El tratamiento control ( $T_0$ ) registró un promedio de 258 HVH/4 g, lo que evidencia la alta carga inicial de patógenos en ausencia de tratamiento. Al aplicar 10 g de óxido de calcio ( $T_1$ ), el promedio disminuyó de forma significativa a 80 HVH/4 g, reflejando un avance importante, aunque aún por encima del valor límite establecido por el Decreto Supremo N° 015-2017 – MVCS para lodos residuales deshidratados Clase A ( $< 1$  HVH/4 g). La aplicación de 50 g ( $T_2$ ) y 100 g ( $T_3$ ) de óxido de calcio

mostró resultados aún más contundentes. En T<sub>2</sub>, el promedio se redujo a 14 HVH/4 g, quedando muy cerca del estándar normativo, y en T<sub>3</sub> se logró la remoción total (0 HVH/4 g), cumpliendo plenamente con los requisitos de inocuidad sanitaria para la reutilización sin restricciones. La tendencia observada en la Figura 10 confirma la relación dosis-respuesta, donde incrementos en la cantidad de óxido de calcio se traducen en una reducción proporcional y consistente de helmintos. Estos resultados no solo cumplen con los criterios establecidos en la normativa nacional, sino que también demuestran la viabilidad técnica del uso de óxido de calcio como agente higienizante. Considero que el tratamiento T<sub>3</sub> representa la condición óptima para garantizar la seguridad sanitaria y ambiental en la gestión de lodos residuales deshidratado, contribuyendo así a una disposición final o reaprovechamiento responsable. La evidencia experimental respalda la hipótesis de que el uso de óxido de calcio en dosis adecuadas es una estrategia eficaz para alcanzar la calidad de lodos residuales deshidratados Clase A conforme a lo mencionado en la legislación vigente.

La normativa peruana vigente es el Decreto Supremo N° 015-2017 - MVCS del Ministerio del Ambiente (MINAM, 2017), establece un valor específico para este parámetro de < 1 HVH/4 g de lodo residual deshidratado para lodos residuales con las características de lodo residual deshidratado Clase A: son aquellos aplicables al suelo sin restricciones sanitarias. La remoción total para huevos viables de helmintos se logró con el tratamiento T<sub>3</sub>: 100 g de óxido de calcio con valores < 1 HVH/4 g de lodo residual deshidratado que es el valor permisible; cumpliendo para los tratamientos descritos con las características de lodo residual deshidratado Clase A. Resultados similares nos muestra Huanca et al. (2022) con valores obtenidos en todos los tratamientos de su estudio con relación a la *Escherichia coli*, los cuales oscilaron entre 99.31 y 143.1 NMP/1g lodo residual deshidratado inferior a la norma nacional Decreto Supremo N° 015-2017 - MVCS, donde

el valor máximo es de <1000 NMP/1g lodo residual deshidratado; no obstante, los huevos de helmintos obtuvieron valores nulos de huevos de helmintos viables, lo que disminuye el riesgo a la salud pública.

Los huevos viables de helmintos, son microorganismos que logran sobrevivir años, convirtiéndolos en grandes indicadores de contaminación. Además, los huevos de helmintos son microorganismos muy resistentes tanto química como mecánicamente por sus capas, caracterizándose como patógenos difíciles de destruir (Escobar et al., 2014, como se citó en Cárdenas, 2022). Difiriendo con Cárdenas y Molina (2022) quienes mencionan en su investigación que la eficiencia de diversos tratamientos para lodos; aunque comúnmente se emplean alternativas como la digestión anaerobia y aerobia para el tratamiento de los lodos in situ, describen que la eliminación de los microorganismos patógenos puede ser muy lenta y algunos parásitos como los helmintos pueden seguir activos aún después del tratamiento, dando paso a la necesidad de investigar nuevas alternativas.

Silva et al. (2013), concluyeron en su investigación que, el tratamiento alcalino mostró que el uso de óxido de calcio en dosis mayores al 9 % con tiempo de contacto de 5 días es altamente eficiente en el proceso de eliminación de coliformes fecales, *Escherichia coli* y huevos de helmintos, coincidiendo con los resultados obtenidos en esta investigación referente al parámetro de huevos viables de helmintos, con una dosis del 20 % y un tiempo de contacto de 5 días.

Sánchez et al. (2020) evaluó que, los indicadores microbiológicos, el valor de los HVH/g se encuentra por debajo del límite máximo establecido en el reglamento para un lodo residual deshidratado Clase B. A nivel mundial, las infecciones por uncinarias en humanos son una de las causas principales de morbilidad (índice de personas enfermas en un lugar y tiempo específicos con respecto al total de la población). Debido a la cantidad de personas afectadas por esta

enfermedad, es considerada como una de las más importantes en el grupo de las infecciones por parásitos, además de la enfermedad desatendida más importante en las zonas tropicales (Haldeman, Nolan y Ng'habi, 2020).

**Tabla 8**

*ANOVA para el número de huevos viables de helmintos.*

| Descripción    |        |      |          |            | Alfa              | 0.05         |             |            |
|----------------|--------|------|----------|------------|-------------------|--------------|-------------|------------|
| Grupos         | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza   | Suma<br>cuadrados | Error Estad. | Mínimo      | Máximo     |
| T <sub>0</sub> | 10     | 2579 | 258      | 1791.87778 | 16126.9           | 6.98468563   | 243.734401  | 272.065599 |
| T <sub>1</sub> | 10     | 798  | 80       | 117.955556 | 1061.6            | 6.98468563   | 65.634401   | 93.965599  |
| T <sub>2</sub> | 10     | 136  | 14       | 41.6       | 374.4             | 6.98468563   | -0.56559902 | 27.765599  |
| T <sub>3</sub> | 10     | 0    | 0        | 0          | 0                 | 6.98468563   | -14.165599  | 14.165599  |

#### ANOVA

| Fuentes      | Suma de<br>cuadrados | Grados de<br>libertad | Promedio de<br>cuadrados | F          | Valor P     | Eta cuadrado | Error<br>cuadrático | Omega<br>cuadrado |
|--------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|------------|-------------|--------------|---------------------|-------------------|
| Entre grupos | 422124.875           | 3                     | 140708.292               | 288.420392 | 3.21167E-25 | 0.96005597   | 5.37047849          | 0.95566694        |
| Sin grupos   | 17562.9              | 36                    | 487.858333               |            |             |              |                     |                   |
| Total        | 439687.775           | 39                    | 11274.0455               |            |             |              |                     |                   |

El análisis de varianza (ANOVA) realizado nos muestra que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos comparados: T<sub>0</sub> (0 gramos de óxido de calcio - muestra testigo), T<sub>1</sub>: 10 gramos de óxido de calcio, T<sub>2</sub>: 50 gramos de óxido de calcio y T<sub>3</sub>: 100 gramos de óxido de calcio respectivamente. (ver Tabla 9).

El valor p obtenido fue de  $3.21167E-25$ , el cual fue muy inferior al nivel de significancia  $\alpha$  establecido, lo que indica que al menos uno de los tratamientos se comportó de manera diferente a los demás. Por otro lado, el coeficiente de variabilidad obtenido fue del 25 %, el cual se encontró por debajo del 30 % considerado como aceptable para este tipo de estudios. Un coeficiente de variabilidad relativamente bajo sugiere que los datos son homogéneos y, por lo tanto, la media de los tratamientos fue representativa de los valores observados. Esto significa que los resultados obtenidos son estadísticamente significativos, indicando que es poco probable que ocurran por casualidad.

**Tabla 9**

*Tukey para el número de huevos viables de helmintos.*

Prueba de Diferencia

Honestamente Significativa

Alfa

0.05

(HSD) de Tukey-Kramer

| Grupo          | Media | Tamaño de grupo | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Valor critico |
|----------------|-------|-----------------|-------------------|--------------------|---------------|
| T <sub>0</sub> | 258   | 10              | 16126.9           |                    |               |
| T <sub>1</sub> | 80    | 10              | 1061.6            |                    |               |
| T <sub>2</sub> | 14    | 10              | 374.4             |                    |               |
| T <sub>3</sub> | 0     | 10              | 0                 |                    |               |
|                |       | 40              | 17562.9           | 36                 | 3.809         |

Prueba Q

| Grupo 1        | Grupo 2        | Media | Error estándar | Estadística Q | Inferior    | Superior   | Valor P    | Valor crítico de la media | Tamaño del efecto de Cohen d |
|----------------|----------------|-------|----------------|---------------|-------------|------------|------------|---------------------------|------------------------------|
| T <sub>0</sub> | T <sub>1</sub> | 178.1 | 6.98468563     | 25.4986422    | 151.495332  | 204.704668 | 7.9936E-15 | 26.6046676                | 8.06337867                   |
| T <sub>0</sub> | T <sub>2</sub> | 244.3 | 6.98468563     | 34.9765205    | 217.695332  | 270.904668 | 7.9936E-15 | 26.6046676                | 11.0605469                   |
| T <sub>0</sub> | T <sub>3</sub> | 257.9 | 6.98468563     | 36.9236375    | 231.295332  | 284.504668 | 7.9936E-15 | 26.6046676                | 11.6762794                   |
| T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | 66.2  | 6.98468563     | 9.47787825    | 39.5953324  | 92.8046676 | 4.7568E-07 | 26.6046676                | 2.99716827                   |
| T <sub>1</sub> | T <sub>3</sub> | 79.8  | 6.98468563     | 11.4249952    | 53.1953324  | 106.404668 | 7.8965E-09 | 26.6046676                | 3.61290072                   |
| T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | 13.6  | 6.98468563     | 1.94711698    | -13.0046676 | 40.2046676 | 0.52165781 | 26.6046676                | 0.61573245                   |

La Tabla 09 presenta la prueba de comparación múltiple de Tukey, la cual resulta esencial para identificar en qué tratamientos específicos se encuentran las diferencias estadísticamente significativas observadas en el ANOVA. Este análisis es clave para validar la eficacia diferencial de las dosis de óxido de calcio aplicadas. Los resultados muestran que el tratamiento T<sub>3</sub> (100 g de óxido de calcio) se diferencia de manera contundente frente a todos los demás, con una reducción total de huevos viables de helmintos (0 HVH/4 g), cumpliendo plenamente con el Decreto Supremo N° 015-2017 - MVCS. Del mismo modo, T<sub>2</sub> (50 g) presenta diferencias significativas respecto a T<sub>0</sub> y T<sub>1</sub>, lo que confirma su mayor eficacia, aunque no logra llegar al valor normativo (< 1 HVH/4 g). Las comparaciones entre T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub> muestran una diferencia de media de solo 13.6 HVH, la cual estadísticamente no es significativa ( $p = 0.521$ ), lo que sugiere que a partir de 50 g ya se alcanza una remoción muy alta, aunque no total. Sin embargo, desde un punto de vista de seguridad sanitaria y cumplimiento legal, es claro que solo T<sub>3</sub> garantiza un lodo residual deshidratado Clase A sin restricciones. Este análisis refuerza la percepción de que, aunque dosis intermedias como la de T<sub>2</sub> logran resultados cercanos al objetivo, la inversión en un tratamiento con 100 g de óxido de calcio por 500 g de lodo seco se justifica plenamente para eliminar cualquier riesgo de incumplimiento normativo. Además, el respaldo estadístico de la prueba de Tukey brinda un sustento robusto para adoptar esta dosis como estándar técnico en plantas de tratamiento que priorizan la salud pública y la seguridad ambiental.

La Tabla 09 presenta la prueba de comparación múltiple de Tukey, la cual resulta esencial para identificar en qué tratamientos específicos se encuentran las diferencias estadísticamente significativas observadas en el ANOVA. Este análisis es clave para validar la eficacia diferencial de las dosis de óxido de calcio aplicadas. Los resultados muestran que el tratamiento T<sub>3</sub> (100 g de óxido de calcio) se diferencia de manera contundente frente a todos los demás, con una reducción

total de huevos viables de helmintos (0 HVH/4 g), cumpliendo plenamente con el Decreto Supremo N° 015-2017 – MVCS. Del mismo modo, T<sub>2</sub> (50 g) presenta diferencias significativas respecto a T<sub>0</sub> y T<sub>1</sub>, lo que confirma su mayor eficacia, aunque no logra llegar al valor normativo (< 1 HVH/4 g). Las comparaciones entre T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub> muestran una diferencia de media de solo 13.6 HVH, la cual estadísticamente no es significativa (p = 0.521), lo que sugiere que a partir de 50 g ya se alcanza una remoción muy alta, aunque no total.

Sin embargo, desde un punto de vista de seguridad sanitaria y cumplimiento legal, es claro que solo T<sub>3</sub> garantiza un lodo residual deshidratado Clase A sin restricciones. Este análisis refuerza mi percepción de que, aunque dosis intermedias como la de T<sub>2</sub> logran resultados cercanos al objetivo, la inversión en un tratamiento con 100 g de óxido de calcio por 500 g de lodo residual deshidratado se justifica plenamente para eliminar cualquier riesgo de incumplimiento normativo. Además, el respaldo estadístico de la prueba de Tukey brinda un sustento robusto para adoptar esta dosis como estándar técnico en plantas de tratamiento que priorizan la salud pública y la seguridad ambiental.

Al comparar las diferencias de medias entre T<sub>0</sub> y los demás tratamientos, se observa lo siguiente: T<sub>0</sub> vs T<sub>1</sub>: Diferencia de medias = 178.1, T<sub>0</sub> vs T<sub>2</sub>: Diferencia de medias = 244.3, T<sub>0</sub> vs T<sub>3</sub>: Diferencia de medias = 257.9. La mayor diferencia de medias se encuentra entre T<sub>0</sub> y T<sub>3</sub>, con una diferencia de 259.7. Además, al analizar los valores p de cada comparación: T<sub>0</sub> vs T<sub>1</sub>: p-value = 7.99361E-15, T<sub>0</sub> vs T<sub>2</sub>: p-value = 7.99361E-15, T<sub>0</sub> vs T<sub>3</sub>: p-value = 7.99361E-15.

Todas las comparaciones muestran valores p extremadamente pequeños, lo que indica que las diferencias son estadísticamente muy significativas. Sin embargo, la comparación con la mayor diferencia de medias es la de T<sub>0</sub> vs T<sub>3</sub>, con una diferencia de 257.9. Por lo tanto, puedo concluir

que el tratamiento T<sub>3</sub> es el más diferente y más eficiente en comparación con el tratamiento T<sub>0</sub>, ya que presenta la mayor diferencia de medias y una diferencia estadísticamente muy significativa.

#### **4.1.2. Resultados de *Escherichia coli***

La tabla 10 muestra los resultados obtenidos para *Escherichia coli*, donde se puede apreciar valores para los cuatro tratamientos aplicados (T<sub>0</sub>: 0 gramos de óxido de calcio, T<sub>1</sub>: 10 gramos de óxido de calcio, T<sub>2</sub>: 50 gramos de óxido de calcio y T<sub>3</sub>: 100 gramos de óxido de calcio), para diez repeticiones realizadas durante cinco meses con frecuencia quincenal, también se muestra en la figura 11 el promedio total para cada tratamiento con resultados de valores que exceden el límite establecido por la normativa nacional vigente (Decreto Supremo N° 015-2017 - MVCS) que van en promedio desde los 25800 NMP/1 g lodo residual deshidratado para el T<sub>0</sub>, para el T<sub>1</sub>: 5972 NMP/1 g lodo residual deshidratado, para el T<sub>2</sub>: 41 NMP/1 g lodo residual deshidratado; y el T<sub>3</sub>: 0 NMP/1 g lodo residual deshidratado siendo este el valor que sí cumple con el límite establecido por la normativa.

La adición de óxido de calcio genera efectos físicos, químicos y microbiológicos significativos sobre la población de *Escherichia coli*. En las condiciones evaluadas, con un tiempo de contacto de cinco días, temperatura promedio de 20 °C y un pH promedio de 13, los mecanismos de inactivación bacteriana se relacionan principalmente con la alcalinización extrema del medio y los cambios estructurales inducidos en la célula bacteriana.

Desde el punto de vista físico, el incremento del pH ocasionado por el óxido de calcio produce desnaturalización de las membranas celulares y altera la permeabilidad, lo cual genera lisis bacteriana y pérdida de la integridad estructural. Investigaciones previas han evidenciado que la alcalinización con óxido de calcio eleva las temperaturas internas de los lodos residuales

deshidratados y contribuye a la disminución de la humedad, factores que intensifican el efecto bactericida (Sánchez et al., 2024). Aunque en el presente caso la temperatura registrada fue de 20 °C, relativamente baja en comparación con los 46–50 °C alcanzados en otras experiencias, el valor extremo del pH asegura la reducción significativa de bacterias Gram negativas como *Escherichia coli*.

A nivel químico el ambiente fuertemente alcalino (pH promedio 13) promueve la hidrólisis de componentes esenciales de la célula bacteriana. El hidróxido formado por la reacción del óxido de calcio con agua ataca enlaces peptídicos y fosfolipídicos, lo que conduce a la desnaturalización de proteínas estructurales y enzimáticas. Ayala et al. (2022) y Huanca et al. (2022) demostraron que, incluso con concentraciones de óxido de calcio entre 8 % y 30 %, se logra mantener un pH superior a 12 por más de 72 horas, condición suficiente para asegurar la higienización y cumplir con los estándares establecidos en la normativa vigente.

A nivel microbiológico, los efectos más relevantes se traducen en la inhibición del metabolismo celular, la pérdida de la capacidad reproductiva y, finalmente, la muerte bacteriana. *Escherichia coli*, como bacteria Gram negativa, presenta una membrana externa sensible a la disrupción por pH extremos, lo que explica su eliminación rápida en estos ambientes. Estudios como el de Malcheva et al. (2022) confirman que la adición de óxido de calcio conduce a la destrucción de la microflora patógena, incluyendo *Escherichia coli*, aunque también reduce la población de microorganismos benéficos.

La normativa peruana D.S. N° 015-2017-VIVIENDA establece límites máximos permisibles de patógenos en lodos para su clasificación y disposición. Bajo estas condiciones experimentales, el tratamiento con óxido de calcio permite alcanzar una reducción compatible con los requisitos para lodos residuales deshidratados de clase A, aptos para usos agrícolas con menor

restricción, tal como lo reportaron Ayala et al. (2022) y Huanca et al. (2022). De esta manera, se evidencia que la combinación de alcalinización intensa y tiempo de exposición es una estrategia efectiva y de bajo costo para la eliminación de *Escherichia coli* en lodos residuales.

El efecto del óxido de calcio sobre *Escherichia coli* tras cinco días de contacto a pH promedio 13 y temperatura promedio de 20 °C se manifiesta en la destrucción de membranas celulares, desnaturalización de proteínas, pérdida de viabilidad metabólica y eliminación casi total de la población bacteriana. Estos hallazgos respaldan la efectividad del tratamiento alcalino como técnica de estabilización y cumplen con la normativa peruana vigente para la disposición segura de lodos residuales deshidratados.

**Tabla 10**

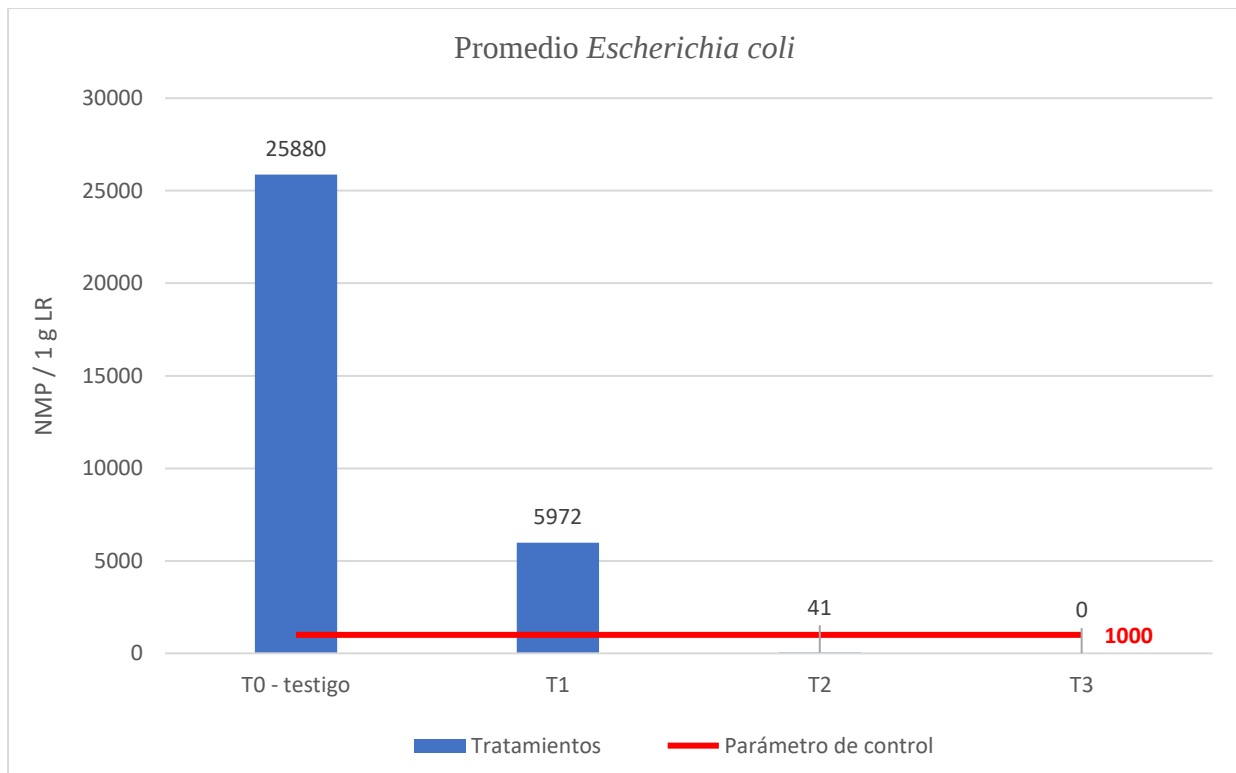
*Número más probable (NMP) de Escherichia coli.*

| Repetición | Fecha      | Tratamientos             |                |                |                | pH                          |                    |                    |                    |
|------------|------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|            |            | T <sub>0</sub> - testigo | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | pH -T <sub>0</sub> -testigo | pH -T <sub>1</sub> | pH -T <sub>2</sub> | pH -T <sub>3</sub> |
| 1°         | 9/02/2024  | 29030                    | 5300           | 36             | 0              | 7.69                        | 8.03               | 12.36              | 12.50              |
| 2°         | 21/02/2024 | 25440                    | 5450           | 12             | 0              | 7.91                        | 7.96               | 12.48              | 12.51              |
| 3°         | 6/03/2024  | 28000                    | 5300           | 23             | 0              | 7.87                        | 8.63               | 12.88              | 12.95              |
| 4°         | 20/03/2024 | 20150                    | 5000           | 53             | 0              | 8.42                        | 8.49               | 12.37              | 12.52              |
| 5°         | 4/04/2024  | 25000                    | 6130           | 30             | 0              | 7.31                        | 7.80               | 12.29              | 12.58              |
| 6°         | 17/04/2024 | 21100                    | 5620           | 34             | 0              | 8.16                        | 8.72               | 12.41              | 12.54              |
| 7°         | 3/05/2024  | 30000                    | 6340           | 48             | 0              | 7.23                        | 10.10              | 12.52              | 12.55              |
| 8°         | 21/05/2024 | 23080                    | 5910           | 54             | 0              | 7.59                        | 7.92               | 11.68              | 12.48              |
| 9°         | 5/06/2024  | 26000                    | 6820           | 53             | 0              | 7.76                        | 8.19               | 12.35              | 12.44              |
| 10°        | 20/06/2024 | 31000                    | 7850           | 70             | 0              | 7.89                        | 8.20               | 12.35              | 12.46              |
| Promedio   |            | 25880                    | 5972           | 41             | 0              | 7.78                        | 8.40               | 12.37              | 12.55              |

*Nota:* La figura nos muestra el promedio total de NMP/1 g de lodo residual deshidratado de *Escherichia coli* para los cuatro tratamientos analizados, antes y después de la aplicación de los tratamientos con óxido de calcio.

**Figura 11**

*Promedio de número más probable (NMP) de Escherichia coli.*



*Nota:* La figura nos muestra el promedio total de NMP / g para *Escherichia coli* para los cuatro tratamientos analizados al quinto día de la aplicación de los tratamientos con óxido de calcio.

Al evaluar los datos expuestos en la Tabla 10 y la Figura 11, se constató que la aplicación de óxido de calcio ejerce un efecto higienizante contundente sobre la carga bacteriana de *Escherichia coli* en los lodo residual deshidratado. El tratamiento sin adición de cal ( $T_0$ ) presentó un promedio de 25 880 NMP/g lodo residual deshidratado, muy por encima del límite establecido por el Decreto Supremo N° 015-2017 – MVCS para lodos residuales deshidratados Clase A (< 1 000 NMP/g lodo residual deshidratado). Este valor confirma la necesidad de un tratamiento efectivo antes de su disposición o reaprovechamiento. Con la adición de 10 g de óxido de calcio ( $T_1$ ), el promedio descendió a 5 972 NMP/g lodo residual deshidratado, lo que implica una reducción significativa, pero aún insuficiente para cumplir con la normativa vigente. En cambio,

el tratamiento con 50 g (T<sub>2</sub>) logró disminuir la carga bacteriana a solo 41 NMP/g lodo residual deshidratado, situándose holgadamente por debajo del umbral normativo y asegurando condiciones sanitarias aceptables. El resultado más notable se observó en el tratamiento con 100 g (T<sub>3</sub>), donde la remoción fue total (0 NMP/g lodo residual deshidratado), garantizando así un producto libre de *Escherichia coli* y completamente seguro para su uso agrícola sin restricciones. La tendencia visualizada en la Figura 11 respalda estos hallazgos, mostrando un descenso abrupto y progresivo en la carga microbiana conforme se incrementa la dosis de óxido de calcio. Este patrón confirma la eficacia del tratamiento, especialmente a partir de la dosis equivalente al 10 % en peso (T<sub>2</sub>). En mi criterio, la dosis aplicada en T<sub>3</sub> representa un nivel óptimo de seguridad, aunque T<sub>2</sub> ya alcanza los estándares requeridos, ofreciendo una alternativa viable en términos de costo-beneficio. Estos resultados demuestran que la cal es un insumo técnico eficaz para la higienización de lodos, cumpliendo con la normativa peruana y promoviendo una gestión ambientalmente responsable.

Los valores obtenidos en los tratamientos T<sub>0</sub> y T<sub>1</sub> con relación a *Escherichia coli*, oscilaron entre 25880 y 5972 NMP/1 g lodo residual deshidratado siendo superiores al límite establecido y los valores del T<sub>2</sub> T<sub>3</sub>: 41 y 0 son el que sí cumplieron con la norma peruana Decreto Supremo N° 015-2017 - MVCS. Se utiliza a *Escherichia coli* como índice de contaminación patogénica; están ubicados dentro del tracto gastrointestinal de la especie humana y de especies de sangre caliente (Fragoso-Castilla et al., 2021).

Se utilizaron proporciones al 2, 10 y 20 % para 500 g de lodo residual deshidratado, teniéndose una remoción por debajo del valor establecido por normativa peruana para 10 y 20 % de óxido de calcio; se demostró que el tratamiento con óxido de calcio si fue eficaz para la

higienización de lodos para los siguientes agentes patógenos: coliformes totales, coliformes fecales, huevos de helmintos y *salmonella* con el 100 % de eliminación de estos agentes patógenos.

En términos de parámetros de remoción los valores obtenidos en todos los tratamientos con relación a la *Escherichia coli*, los valores oscilaron entre 99.31 y 143.1 NMP/1g lodo residual deshidratado inferior a la norma nacional Decreto Supremo N° 015-2017 – MVCS donde el valor máximo es de <1000 NMP/1g lodo residual deshidratado (Huanca et al., 2022). En otro estudio se determinó que el pH alcanzó un valor de 12 al aplicar una dosis de CaO del 13 %, este pH logró mantenerse durante 96 horas resultando en una inmediata eliminación de coliformes fecales, huevecillos de helmintos y otros microorganismos de control como *Salmonella sp.*, y bacteriófagos (Castellanos-Rozo, Galvis-López, Merchán-Castellanos, Manjarres-Hernández y Rojas, 2020). En la PTAR de Celendín la extracción de lodo residual deshidratado se realiza a los 20 o 30 días dependiendo del criterio del operador.

**Tabla 11**

ANOVA para número más probable (NMP) de *Escherichia coli*.

| Descripción    |        |        |          |            | Alpha 0.05     |              |             |            |
|----------------|--------|--------|----------|------------|----------------|--------------|-------------|------------|
| Grupos         | Cuenta | Suma   | Promedio | Varianza   | Suma cuadrados | Error Estad. | Mínimo      | Máximo     |
| T <sub>0</sub> | 10     | 258800 | 25880    | 13567711.1 | 122109400      | 598.067875   | 24667.0621  | 27092.9379 |
| T <sub>1</sub> | 10     | 59720  | 5972     | 739395.556 | 6654560        | 598.067875   | 4759.06213  | 7184.93787 |
| T <sub>2</sub> | 10     | 413    | 41       | 300.677778 | 2706.1         | 598.067875   | -1171.63787 | 1254.23787 |
| T <sub>3</sub> | 10     | 0      | 0        | 0          | 0              | 598.067875   | -1212.93787 | 1212.93787 |

| ANOVA        |                   |                    |                       |            |            |              |                  |                |
|--------------|-------------------|--------------------|-----------------------|------------|------------|--------------|------------------|----------------|
| Fuentes      | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de cuadrados | F          | Valor P    | Eta cuadrado | Error cuadrático | Omega cuadrado |
| Entre grupos | 4511452435        | 3                  | 1503817478            | 420.430464 | 4.5915E-28 | 0.97224987   | 6.48406095       | 0.96919028     |
| Sin grupos   | 128766666         | 36                 | 3576851.84            |            |            |              |                  |                |
| Total        | 4640219101        | 39                 | 118979977             |            |            |              |                  |                |

La Tabla 11 presenta el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar las diferencias entre los tratamientos aplicados en la reducción de *Escherichia coli*. Los resultados son estadísticamente contundentes: el valor F obtenido (420.43) y el valor p extremadamente bajo (4.59E-28) confirman que las diferencias entre tratamientos no son producto del azar, sino consecuencia directa de la dosis de óxido de calcio utilizada. El promedio más alto corresponde al tratamiento control (T<sub>0</sub>) con 25,880 NMP/g lodo residual deshidratado, seguido por T<sub>1</sub> con 5,972 NMP/g lodo residual deshidratado, ambos fuera de los límites que exige el Decreto Supremo N° 015-2017 – MVCS para un lodo residual deshidratado Clase A. En cambio, T<sub>2</sub> (41 NMP/g lodo residual deshidratado) y T<sub>3</sub> (0 NMP/g lodo residual deshidratado) no solo cumplen con la normativa (< 1,000 NMP/g lodo residual deshidratado), sino que lo hacen con un amplio margen de seguridad. El valor de Eta-cuadrado (0.972) indica que el 97.2 % de la variabilidad en la presencia de *Escherichia coli* se explica por la dosis de óxido de calcio, lo que deja claro que este factor es el determinante principal en el resultado de higienización. La varianza dentro de los tratamientos efectivos (T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>) es mínima, lo que demuestra consistencia y confiabilidad en los resultados. Estos datos respaldan de forma sólida la aplicación de dosis iguales o superiores a 50 g por 500 g de lodo residual deshidratado, aunque la eliminación total observada en T<sub>3</sub> justifica su preferencia para aplicaciones que requieran el más alto nivel de seguridad sanitaria. Además, el sustento estadístico del ANOVA refuerza la credibilidad técnica de estos hallazgos, ofreciendo evidencia robusta para que operadores de plantas de tratamiento ajusten sus protocolos de desinfección y cumplan de forma garantizada con la normativa vigente.

El análisis de varianza (ANOVA) realizado nos muestra que existen diferencias estadísticamente muy significativas entre los tratamientos comparados: T<sub>0</sub> (0 gramos de óxido de calcio - muestra testigo), T<sub>1</sub>: 10 gramos de óxido de calcio, T<sub>2</sub>: 50 gramos de óxido de calcio y T<sub>3</sub>:

100 gramos de óxido de calcio respectivamente. (ver Tabla 13. El valor  $p$  obtenido es de  $4.5915E-28$ , el cual es extremadamente inferior al nivel de significancia  $\alpha$  establecido, lo que indica que al menos uno de los tratamientos se comporta de manera muy diferente a los demás.

Además, el coeficiente de variabilidad obtenido es del 24 %, el cual se encuentra por debajo del 30 % considerado como aceptable para este tipo de estudios.

Un coeficiente de variabilidad relativamente bajo sugiere que los datos son homogéneos y, por lo tanto, la media de los tratamientos es representativa de los valores observados.

**Tabla 12**

*Tukey para número más probable (NMP) de Escherichia coli.*

Prueba de Diferencia

Honestamente

Significativa (HSD) de

Tukey-Kramer

Alfa

0.05

| Grupo          | Media | Tamaño de grupo | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Valor critico |
|----------------|-------|-----------------|-------------------|--------------------|---------------|
| T <sub>0</sub> | 25880 | 10              | 122109400         |                    |               |
| T <sub>1</sub> | 5972  | 10              | 6654560           |                    |               |
| T <sub>2</sub> | 41    | 10              | 2706.1            |                    |               |
| T <sub>3</sub> | 0     | 10              | 0                 |                    |               |
|                |       | 40              | 128766666         | 36                 | 3.809         |

Prueba Q

| Grupo 1        | Grupo 2        | Media   | Error estándar | Estadística Q | Inferior    | Superior   | Valor P    | Valor crítico de la media | Tamaño del efecto de Cohen d |
|----------------|----------------|---------|----------------|---------------|-------------|------------|------------|---------------------------|------------------------------|
| T <sub>0</sub> | T <sub>1</sub> | 19908   | 598.067875     | 33.2871917    | 17629.9595  | 22186.0405 | 7.9936E-15 | 2278.04054                | 10.5263343                   |
| T <sub>0</sub> | T <sub>2</sub> | 25838.7 | 598.067875     | 43.2036246    | 23560.6595  | 28116.7405 | 7.9936E-15 | 2278.04054                | 13.6621857                   |
| T <sub>0</sub> | T <sub>3</sub> | 25880   | 598.067875     | 43.2726803    | 23601.9595  | 28158.0405 | 7.9936E-15 | 2278.04054                | 13.684023                    |
| T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | 5930.7  | 598.067875     | 9.91643297    | 3652.65946  | 8208.74054 | 1.8629E-07 | 2278.04054                | 3.13585145                   |
| T <sub>1</sub> | T <sub>3</sub> | 5972    | 598.067875     | 9.98548868    | 3693.95946  | 8250.04054 | 1.6083E-07 | 2278.04054                | 3.15768878                   |
| T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | 41.3    | 598.067875     | 0.06905571    | -2236.74054 | 2319.34054 | 0.99995736 | 2278.04054                | 0.02183733                   |

La Tabla 12 muestra los resultados de la prueba de Tukey para comparar, par a par, las medias de los tratamientos aplicados en la reducción de *Escherichia coli*. Este análisis es clave porque identifica con precisión en qué pares de tratamientos se encuentran las diferencias estadísticamente significativas. Los datos revelan que las diferencias entre el control ( $T_0$ ) y cualquier otro tratamiento son muy amplias y altamente significativas, con valores  $p$  prácticamente nulos ( $p < 0.000000000000008$ ). Por ejemplo, entre  $T_0$  y  $T_1$  la diferencia de medias es de 19,908 NMP/g lodo residual deshidratado, mientras que entre  $T_0$  y  $T_3$  es de 25,880 NMP/g lodo residual deshidratado, lo que confirma la drástica eficacia de los tratamientos con óxido de calcio. Es relevante que las comparaciones  $T_1-T_2$  y  $T_1-T_3$  también arrojen diferencias significativas, mostrando que pasar de una dosis baja (10 g) a una intermedia (50 g) o alta (100 g) implica una mejora sustancial en el control bacteriano.

Sin embargo, la diferencia entre  $T_2$  y  $T_3$  es mínima (41.3 NMP/g lodo residual deshidratado) y no significativa ( $p \approx 1$ ), lo que indica que, desde el punto de vista estadístico, ambos tratamientos logran niveles muy similares de eliminación de *Escherichia coli*. No obstante, desde una perspectiva normativa, aunque  $T_2$  cumple con el límite de  $< 1,000$  NMP/g lodo residual deshidratado establecido por el Decreto Supremo N° 015-2017 - MVCS,  $T_3$  ofrece una eliminación absoluta, lo que elimina cualquier margen de riesgo en condiciones de operación variables.

Esta tabla confirma la importancia de aplicar dosis adecuadas y refuerza que, si bien 50 g de óxido de calcio ya permiten cumplir la normativa, optar por 100 g garantiza la inocuidad total del lodo residual deshidratado. Esto es particularmente relevante para usos en agricultura o en zonas ambientalmente sensibles, donde incluso pequeñas cantidades residuales de patógenos podrían representar un riesgo.

Comparando las diferencias de medias entre  $T_0$  y los demás tratamientos:  $T_0$  vs  $T_1$ : Diferencia de medias = 19908,  $T_0$  vs  $T_2$ : Diferencia de medias = 25838.7,  $T_0$  vs  $T_3$ : Diferencia de medias = 25880. Se observa que la mayor diferencia de medias se encuentra entre  $T_0$  y  $T_3$ , con una diferencia de 25880. Además, al analizar los valores p de cada comparación:  $T_0$  vs  $T_1$ : p-value = 7.9936E-15,  $T_0$  vs  $T_2$ : p-value = 7.9936E-15,  $T_0$  vs  $T_3$ : p-value = 7.9936E-15.

Todas las comparaciones muestran valores p extremadamente pequeños, lo que indica que las diferencias son estadísticamente muy significativas. Por otro lado, al revisar los tamaños del efecto (Cohen's d):  $T_0$  vs  $T_1$ : Cohen's d = 10.5263343,  $T_0$  vs  $T_2$ : Cohen's d = 13.6621857,  $T_0$  vs  $T_3$ : Cohen's d = 13.684023. Los tamaños del efecto son muy grandes en todas las comparaciones, pero la mayor magnitud se observa en las comparaciones de  $T_0$  vs  $T_2$  y  $T_0$  vs  $T_3$ . En conclusión, al comparar los tratamientos en relación al tratamiento  $T_0$ , el tratamiento  $T_3$  es el más eficiente. Esto se evidencia por la mayor diferencia de medias (25880), el valor p extremadamente pequeño (7.9936E-15) y el tamaño del efecto más grande (Cohen's d = 13.684023) en comparación con los demás tratamientos. Por lo tanto, puedo afirmar que el tratamiento  $T_3$  es el más eficiente en comparación con el tratamiento  $T_0$ .

#### **4.1.3. Resultados de *Enterobacter aerogenes***

La tabla 13 y la figura 12 muestran el promedio de valores para la cantidad de Número más probable (NMP)/1 g lodo residual deshidratado de *Enterobacter aerogenes* que contiene la muestra de lodo residual sin aplicar el tratamiento con óxido de calcio  $T_0$  (0 gramos de óxido de calcio, muestra testigo) y los otros tres tratamientos con aplicación de óxido de calcio ( $T_1$ : 10 gramos de óxido de calcio,  $T_2$ : 50 gramos de óxido de calcio y  $T_3$ : 100 gramos de óxido de calcio respectivamente).

También se observa que los resultados obtenidos tienen valores con un comportamiento decreciente, que van desde los 245000 NMP/1 g para el T<sub>0</sub>, para el T<sub>1</sub>: 60830 NMP/1 g y para el T<sub>2</sub>: 390 NMP/1 g lodo residual deshidratado; y el T<sub>3</sub>: 0 NMP/1 g lodo residual deshidratado, lográndose en este último tratamiento la remoción completa del parámetro analizado.

El tratamiento con óxido de calcio genera un entorno fuertemente alcalino (pH promedio 13) que impacta de manera significativa en bacterias como *Enterobacter aerogenes* y *Escherichia coli*. Desde un punto de vista físico, la reacción exotérmica de hidratación del óxido de calcio puede elevar la temperatura local del sustrato, aunque en este caso el promedio se mantuvo en 20 °C. Aún sin alcanzar temperaturas letales, la alcalinización induce deshidratación parcial de las células bacterianas y modifica la matriz del lodo, reduciendo la disponibilidad de agua libre y generando estrés osmótico que afecta la integridad de la membrana celular (Sánchez et al., 2024).

En cuanto al efecto químico, el ambiente altamente alcalino desestabiliza las membranas bacterianas y desnaturaliza proteínas estructurales y enzimáticas. El pH promedio 13 provoca hidrólisis de fosfolípidos y ácidos nucleicos, generando pérdida de la permeabilidad selectiva y lisis celular. Este mecanismo ha sido documentado en experiencias de higienización de lodos residuales deshidratados donde la adición de óxido de calcio permitió alcanzar reducciones significativas de bacterias Gram negativas como *Enterobacter* y *Escherichia coli* (Ayala et al., 2022). A diferencia de otros agentes químicos que requieren concentraciones más elevadas o tiempos prolongados, el óxido de calcio mantiene su eficacia en periodos relativamente cortos debido a la estabilidad del pH alcanzado (Huanca et al., 2022).

A nivel microbiológico, los efectos sobre *Enterobacter aerogenes* y *Escherichia coli* incluyen la pérdida de viabilidad, inhibición del metabolismo respiratorio y daño en el ADN

bacteriano. Malcheva et al. (2022) reportaron que el óxido de calcio en combinación con cenizas logra la eliminación casi completa de *Escherichia coli* y otros patógenos en lodos residuales deshidratados, aunque también reduce la población de microorganismos beneficiosos. De manera similar, Cárdenas (2022) resalta que los lodos residuales deshidratados estabilizados alcalinamente presentan menor concentración de coliformes fecales, lo cual mejora su clasificación sanitaria. Por lo tanto, después de cinco días de contacto, se espera una disminución considerable de la viabilidad de *Enterobacter aerogenes* y *Escherichia coli*, incluso en ausencia de temperaturas elevadas, debido a los daños irreversibles en membrana, enzimas y material genético.

La aplicación de óxido de calcio debe ser evaluada bajo el marco normativo nacional. El DS N° 015-2017-VIVIENDA establece límites microbiológicos para la clasificación de lodos (Clase A y B) según su contenido de patógenos. Para alcanzar la categoría A, se requiere ausencia de *Salmonella* y reducción drástica de coliformes fecales y otros indicadores. En este sentido, la evidencia indica que la alcalinización con óxido de calcio representa una alternativa viable para cumplir con dicha normativa, siempre que se controle la dosificación y la estabilidad del pH.

**Tabla 13**

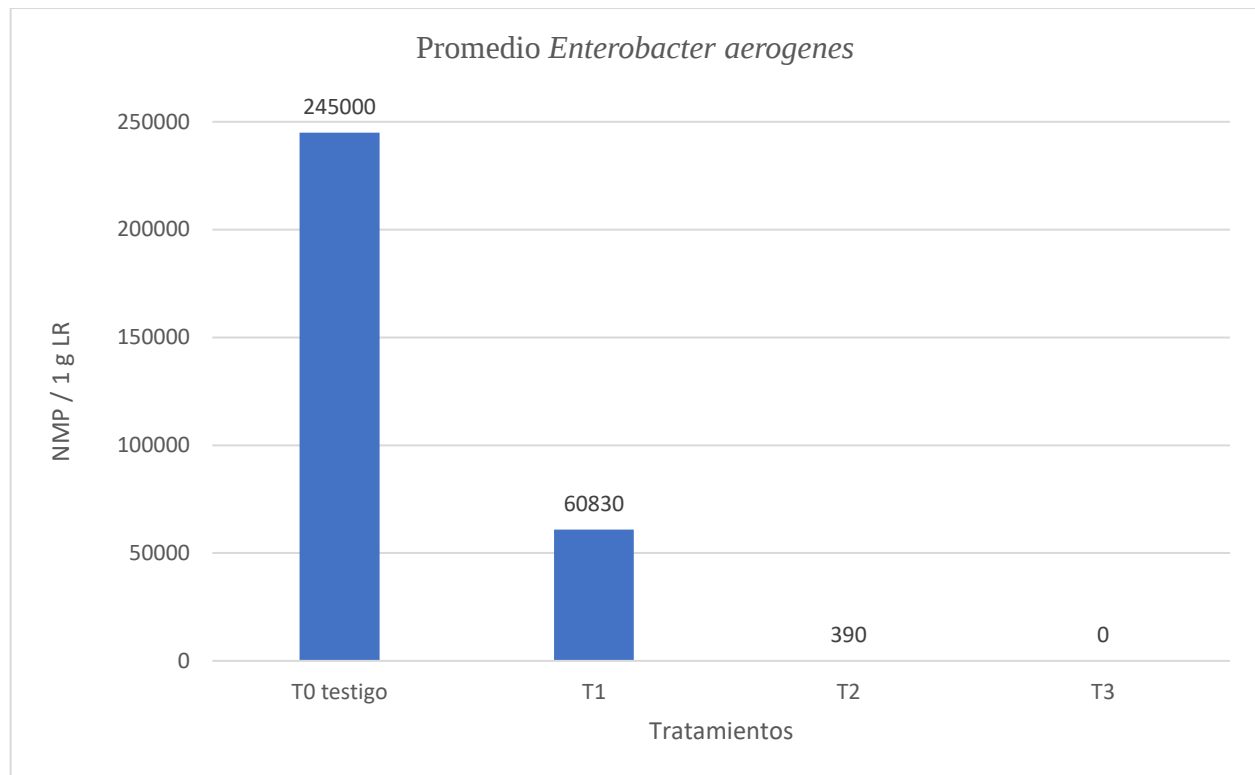
*Número más probable (NMP) de Enterobacter aerogenes.*

| Repetición | Fecha      | Tratamientos           |                |                |                | pH                          |                    |                    |                    |
|------------|------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|            |            | T <sub>0</sub> testigo | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | pH -T <sub>0</sub> -testigo | pH -T <sub>1</sub> | pH -T <sub>2</sub> | pH -T <sub>3</sub> |
| 1°         | 9/02/2024  | 281900                 | 60000          | 0              | 0              | 7.69                        | 8.03               | 12.36              | 12.50              |
| 2°         | 21/02/2024 | 252000                 | 65000          | 350            | 0              | 7.91                        | 7.96               | 12.48              | 12.51              |
| 3°         | 6/03/2024  | 243000                 | 67000          | 400            | 0              | 7.87                        | 8.63               | 12.88              | 12.95              |
| 4°         | 20/03/2024 | 183000                 | 62000          | 550            | 0              | 8.42                        | 8.49               | 12.37              | 12.52              |
| 5°         | 4/04/2024  | 253000                 | 51600          | 360            | 0              | 7.31                        | 7.80               | 12.29              | 12.58              |
| 6°         | 17/04/2024 | 323600                 | 35000          | 380            | 0              | 8.16                        | 8.72               | 12.41              | 12.54              |
| 7°         | 3/05/2024  | 212000                 | 72000          | 590            | 0              | 7.23                        | 10.10              | 12.52              | 12.55              |
| 8°         | 21/05/2024 | 257500                 | 61700          | 480            | 0              | 7.59                        | 7.92               | 11.68              | 12.48              |
| 9°         | 5/06/2024  | 245000                 | 79000          | 510            | 0              | 7.76                        | 8.19               | 12.35              | 12.44              |
| 10°        | 20/06/2024 | 199000                 | 55000          | 278            | 0              | 7.89                        | 8.20               | 12.35              | 12.46              |
| Promedio   |            | 245000                 | 60830          | 390            | 0              | 7.78                        | 8.40               | 12.37              | 12.55              |

*Nota:* Valores de NMP/1 g lodo residual deshidratado para *Enterobacter aerogenes* para los cuatro tratamientos analizados, antes y después de la aplicación de los tratamientos con óxido de calcio.

**Figura 12**

*Promedio de número más probable (NMP) de Enterobacter aerogenes.*



*Nota:* Se puede apreciar en la figura, el promedio total de NMP/1 g lodo residual deshidratado para *Enterobacter aerogenes* para los cuatro tratamientos analizados, al quinto día de la aplicación de los tratamientos con óxido de calcio.

El análisis de los resultados presentados en la Tabla 13 y la Figura 12 revela con claridad que el óxido de calcio también ejerce un efecto desinfectante relevante frente a *Enterobacter aerogenes*, a pesar de que el Decreto Supremo N° 015-2017 – MVCS no establece un límite normativo específico para este microorganismo. El tratamiento control (T<sub>0</sub>) evidenció un promedio de 245 000 NMP/g lodo residual deshidratado, lo que refleja una alta contaminación inicial y un riesgo potencial para la salud pública, considerando que esta bacteria puede actuar como patógeno oportunista. Con la adición de 10 g de óxido de calcio (T<sub>1</sub>), la carga microbiana se redujo de forma

importante hasta 60 830 NMP/g lodo residual deshidratado. Sin embargo, estos valores aún representan un nivel de riesgo sanitario considerable si se contemplara un uso agrícola directo. El tratamiento con 50 g de óxido de calcio (T<sub>2</sub>) mostró una disminución drástica, alcanzando solo 390 NMP/g lodo residual deshidratado, lo que supone una reducción superior al 99 % respecto al control. Finalmente, con 100 g (T<sub>3</sub>) se logró la eliminación total (0 NMP/g lodo residual deshidratado), resultado que garantiza un producto inocuo desde el punto de vista microbiológico. La tendencia observada en la Figura 12 confirma una relación dosis-respuesta clara, similar a la vista en los casos de helmintos y *Escherichia coli*. Aunque la normativa vigente no exige un valor de referencia para *Enterobacter aerogenes*, considero que la remoción total obtenida en T<sub>3</sub> y el nivel residual extremadamente bajo en T<sub>2</sub> cumplen con los principios de precaución y seguridad sanitaria que deben guiar la reutilización de lodos residuales deshidratados . Estos resultados fortalecen la evidencia de que el óxido de calcio, aplicado en dosis adecuadas, constituye una herramienta eficaz para la higienización integral de lodos residuales, reforzando así la sostenibilidad y el cumplimiento de buenas prácticas en la gestión de residuos de origen urbano.

Especies del género *Enterobacter* como *Enterobacter aerogenes* habitualmente son aisladas de fuentes hídricas y sistemas de tratamiento de aguas residuales. Hallazgos de Kämpfer et al. (2005, como se citó en Egamberdieva et al. (2024) indicaron que *E. radicincitans* y *E. cloacae* han sido encontradas en rizósfera de trigo y arroz, promoviendo el crecimiento vegetal en estos cultivos, lo que coincide con los resultados del análisis de nuestra muestra en blanco T<sub>0</sub>: 0 g de óxido de calcio, con la presencia de *Enterobacter aerogenes* en el lodo residual deshidratado de la PTAR Celendín.

Esta investigación muestra la importancia ambiental y salud pública de estudiar este parámetro y su higienización con óxido de calcio; estudios como los realizados por García Fraile

(2012) refutan el uso de especies de enterobacterias como *Escherichia coli* en biofertilizantes y como promotores de crecimiento vegetal debido a su capacidad de persistir en los alimentos. Esto implica un posible efecto negativo en la salud de los consumidores de estos productos.

En la presente investigación se realizó la higienización de lodos con el 2 %, 10 % y 20 % de óxido de calcio para 500 g de lodo residual deshidratado (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>), observando que en el segundo y tercer porcentaje los resultados mostraron una remoción total de *Enterobacter aerogenes* estando de acuerdo con lo que indican Torres et al. (2021), se recomienda higienizar el lodo en un rango de 10 % a 20 % de óxido de calcio (50 y 100 gramos de óxido de calcio / 500 gramos de lodo residual deshidratado, respectivamente).

**Tabla 14**

ANOVA para número más probable (NMP) de *Enterobacter aerogenes*.

| Descripción |        |      |          |          | Alfa              | 0.05         |            |             |            |
|-------------|--------|------|----------|----------|-------------------|--------------|------------|-------------|------------|
| Grupos      | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | Suma<br>cuadrados | Error Estad. | Mínimo     | Máximo      | Grupos     |
| T0          | 10     |      | 2450000  | 245000   | 1651313333        | 1.4862E+10   | 6700.25631 | 231411.25   | 258588.75  |
| T1          | 10     |      | 608300   | 60830    | 144395667         | 1299561000   | 6700.25631 | 47241.2504  | 74418.7496 |
| T2          | 10     |      | 3898     | 390      | 28382.6222        | 255443.6     | 6700.25631 | -13198.9496 | 13978.5496 |
| T3          | 10     |      | 0        | 0        | 0                 | 0            | 6700.25631 | -13588.7496 | 13588.7496 |

## ANOVA

| Fuentes         | Suma de<br>cuadrados | Grados<br>de<br>libertad | Promedio<br>de<br>cuadrados | F          | Valor P   | Eta cuadrado | Error cuadrático | Omega<br>cuadrado | Fuentes    |
|-----------------|----------------------|--------------------------|-----------------------------|------------|-----------|--------------|------------------|-------------------|------------|
| Entre<br>grupos | 4.02828E+11          |                          | 3                           | 1.3428E+11 | 299.09941 | 1.7138E-25   | 0.96142712       | 5.46899817        | 0.95718712 |
| Sin grupos      | 16161636444          |                          | 36                          | 448934346  |           |              |                  |                   |            |
| Total           | 4.1899E+11           |                          | 39                          | 1.0743E+10 |           |              |                  |                   |            |

La Tabla 14 presenta el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar el efecto de las distintas dosis de óxido de calcio sobre la concentración de *Enterobacter aerogenes* en lodo residual deshidratado. Los resultados estadísticos son contundentes: el valor F obtenido (299.10) y el valor p extremadamente bajo ( $1.71E-25$ ) confirman que las diferencias entre tratamientos son altamente significativas y están directamente asociadas a la cantidad de óxido de calcio utilizada. El promedio más alto corresponde al tratamiento control ( $T_0$ ) con 245,000 NMP/g lodo residual deshidratado, seguido por  $T_1$  con 60,830 NMP/g lodo residual deshidratado, ambos con valores claramente elevados y que, aunque no existe un límite legal específico para esta bacteria en el Decreto Supremo N° 015-2017 - MVCS, representan un riesgo sanitario si el lodo residual deshidratado se reutiliza sin tratamiento adicional. En contraste,  $T_2$  (390 NMP/g) lodo residual deshidratado y  $T_3$  (0 NMP/g lodo residual deshidratado) muestran niveles muy bajos, siendo  $T_3$  el único que logra la eliminación absoluta. El valor de Eta-cuadrado (0.961) indica que el 96.1 % de la variabilidad en los resultados se explica por la dosis de óxido de calcio, lo que refuerza la idea de que este es el factor determinante en la remoción de la bacteria. Además, la varianza mínima dentro de los tratamientos  $T_2$  y  $T_3$  demuestra que, una vez alcanzada la dosis efectiva, los resultados son consistentes. Esta tabla confirma que, incluso para patógenos no regulados explícitamente, el uso de dosis altas de óxido de calcio (100 g por 500 g de lodo residual deshidratado) es la mejor estrategia para garantizar un producto final inocuo. Aunque  $T_2$  logra reducciones muy importantes,  $T_3$  elimina cualquier posibilidad de riesgo, lo que es especialmente relevante en contextos donde la seguridad sanitaria debe ser absoluta.

El análisis de varianza (ANOVA) realizado nos muestra que existen diferencias estadísticamente muy significativas entre los tratamientos comparados:  $T_0$  (0 gramos de óxido de calcio - muestra testigo),  $T_1$ : 10 gramos de óxido de calcio,  $T_2$ : 50 gramos de óxido de calcio y  $T_3$ :

100 gramos de óxido de calcio respectivamente. (ver Tabla 16). El valor p obtenido es de  $1.7138E-25$ , el cual es extremadamente inferior al nivel de significancia  $\alpha$  establecido, lo que indica que al menos uno de los tratamientos se comporta de manera muy diferente a los demás.

En cuanto al coeficiente de variabilidad, este se encuentra en un 28 %, lo cual se considera aceptable para este tipo de estudios.

Un coeficiente de variabilidad dentro del rango del 20-30 % sugiere que los datos presentan una dispersión moderada, y que la media de los tratamientos es representativa de los valores observados.

**Tabla 15**

*Tukey para número más probable (NMP) de Enterobacter aerogenes.*

Prueba de Diferencia

Honestamente

Alfa

0.05

Significativa (HSD)

de Tukey-Kramer

| Grupo          | Media  | Tamaño de grupo | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Valor critico |
|----------------|--------|-----------------|-------------------|--------------------|---------------|
| T <sub>0</sub> | 245000 | 10              | 1.4862E+10        |                    |               |
| T <sub>1</sub> | 60830  | 10              | 1299561000        |                    |               |
| T <sub>2</sub> | 390    | 10              | 255443.6          |                    |               |
| T <sub>3</sub> | 0      | 10              | 0                 |                    |               |
|                |        | 40              | 1.6162E+10        | 36                 | 3.809         |

Prueba Q

| Grupo 1        | Grupo 2        | Media    | Error estándar | Estadística Q | Inferior    | Superior   | Valor P    | Valor crítico de la media | Tamaño del efecto de Cohen d |
|----------------|----------------|----------|----------------|---------------|-------------|------------|------------|---------------------------|------------------------------|
| T <sub>0</sub> | T <sub>1</sub> | 184170   | 6700.25631     | 27.4870082    | 158648.724  | 209691.276 | 7.9936E-15 | 25521.2763                | 8.6921552                    |
| T <sub>0</sub> | T <sub>2</sub> | 244610.2 | 6700.25631     | 36.5075885    | 219088.924  | 270131.476 | 7.9936E-15 | 25521.2763                | 11.5447132                   |
| T <sub>0</sub> | T <sub>3</sub> | 245000   | 6700.25631     | 36.5657654    | 219478.724  | 270521.276 | 7.9936E-15 | 25521.2763                | 11.5631103                   |
| T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | 60440.2  | 6700.25631     | 9.02058029    | 34918.9237  | 85961.4763 | 1.2723E-06 | 25521.2763                | 2.85255795                   |
| T <sub>1</sub> | T <sub>3</sub> | 60830    | 6700.25631     | 9.07875717    | 35308.7237  | 86351.2763 | 1.1223E-06 | 25521.2763                | 2.8709551                    |
| T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | 389.8    | 6700.25631     | 0.05817688    | -25131.4763 | 25911.0763 | 0.9999745  | 25521.2763                | 0.01839714                   |

Comparando los tratamientos con T<sub>0</sub>:

T<sub>0</sub> vs T<sub>1</sub>: Diferencia de medias: 184170, Valor p: 7.9936E-15

T<sub>0</sub> vs T<sub>2</sub>: Diferencia de medias: 244610.2, Valor p: 7.9936E-15

T<sub>0</sub> vs T<sub>3</sub>: Diferencia de medias: 245000, Valor p: 7.9936E-15

Todas las comparaciones entre T<sub>0</sub> y los demás tratamientos (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>) muestran diferencias de medias muy grandes y valores p extremadamente pequeños (7.9936E-15). Esto indica que las diferencias entre estos tratamientos son estadísticamente muy significativas.

Al comparar los tamaños del efecto: T<sub>0</sub> vs T<sub>1</sub>: Cohen's d = 8.6921552, T<sub>0</sub> vs T<sub>2</sub>: Cohen's d = 11.5447132, T<sub>0</sub> vs T<sub>3</sub>: Cohen's d = 11.5631103. Los tamaños del efecto son muy grandes en todas las comparaciones, pero los mayores se observan en las comparaciones de T<sub>0</sub> vs T<sub>2</sub> y T<sub>0</sub> vs T<sub>3</sub>. Por lo tanto, en base a los resultados del análisis de Tukey, puedo concluir que los tratamientos T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub> son los más eficientes o diferentes al tratamiento T<sub>0</sub> (el blanco). Ambos tratamientos muestran diferencias de medias muy grandes, valores p extremadamente pequeños y tamaños del efecto muy grandes en comparación con el tratamiento T<sub>0</sub>. Aunque las diferencias entre T<sub>0</sub> y T<sub>1</sub> también son estadísticamente significativas, los resultados indican que los tratamientos T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub> son los que se comportan de manera más diferente y eficiente en comparación con el tratamiento T<sub>0</sub>.

La Tabla 15 presenta los resultados de la prueba de Tukey, que compara de manera estadística cada par de tratamientos para determinar dónde existen diferencias significativas en la reducción de *Enterobacter aerogenes*. Este análisis es especialmente útil para confirmar qué dosis de óxido de calcio ofrecen ventajas reales sobre otras. Los datos muestran que las diferencias entre el control (T<sub>0</sub>) y cualquier otro tratamiento son muy amplias y altamente significativas ( $p < 0.0000000000000008$ ). Por ejemplo, la diferencia de medias entre T<sub>0</sub> y T<sub>1</sub> es de 184,170 NMP/g

lodo residual deshidratado, mientras que entre  $T_0$  y  $T_3$  es de 245,000 NMP/g lodo residual deshidratado, reflejando la drástica reducción lograda por el óxido de calcio. También se observa que las comparaciones entre  $T_1$  y  $T_2$ , así como entre  $T_1$  y  $T_3$ , arrojan valores  $p$  extremadamente bajos, confirmando que aumentar la dosis de 10 g a 50 g o más genera mejoras significativas en la eliminación del patógeno. En cambio, la diferencia entre  $T_2$  y  $T_3$  es mínima (389.8 NMP/g lodo residual deshidratado) y no significativa ( $p \approx 1$ ), lo que indica que, estadísticamente, ambos tratamientos logran niveles muy similares de remoción. No obstante, desde un punto de vista sanitario, el hecho de que  $T_3$  logre 0 NMP/g lodo residual deshidratado lo convierte en la opción más segura, especialmente si se busca un lodo residual deshidratado totalmente libre de este microorganismo. Aunque no exista un límite regulatorio específico en el Decreto Supremo N° 015-2017 - MVCS, la eliminación absoluta es siempre preferible para minimizar riesgos. Esta tabla refuerza que la elección entre  $T_2$  y  $T_3$  debe considerar el contexto de uso del lodo residual deshidratado:  $T_2$  es suficiente para un control eficaz, pero  $T_3$  es la garantía total cuando la inocuidad es prioritaria, especialmente en aplicaciones agrícolas o en zonas ambientalmente sensibles.

#### **4.1.4. Correlación entre los parámetros analizados: huevos de helmintos, *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes***

Como parte del cumplimiento del último objetivo del presente trabajo de investigación, se desarrolló el análisis de los resultados de los parámetros microbiológicos analizados, en la tabla 19 se pueden apreciar los valores promedio para los tres parámetros: huevos de helmintos, *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes*. Se logró una disminución progresiva desde el  $T_0$  hasta el  $T_3$  con valores para huevos de helmintos: 258, 80, 14 y 0, *Escherichia coli*: 25880, 5972, 41 y 0, y para *Enterobacter aerogenes*: 24500, 60830, 390 y 0. Apreciándose que para los tres

parámetros existe una remoción total en el T<sub>3</sub> (100 g de óxido de calcio) siendo este el más eficiente con una proporción del 20 % en 500 gramos de lodo residual deshidratado.

**Tabla 16**

*Promedio del N° de Huevos Viables de Helmintos (HVH), Número Más Probable (NMP) de Escherichia coli y Número Más Probable (NMP) de Enterobacter aerogenes.*

| Parámetro                     | Unidad                                    | Parámetro de Higienización* | Tratamientos   |                |                |                |
|-------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                               |                                           |                             | T <sub>0</sub> | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> |
| Huevos de helmintos           | HVH* / 4 g de lodo residual deshidratado* | < 1                         | 258            | 80             | 14             | 0              |
| <i>Escherichia coli</i>       | NMP* / 1 g lodo residual deshidratado     | < 1000                      | 25880          | 5972           | 41             | 0              |
| <i>Enterobacter aerogenes</i> | NMP*                                      | N. E*.                      | 245000         | 60830          | 390            | 0              |

*Nota:* \* Tomado como referencia de la normativa nacional vigente Decreto Supremo N° 015-2017 – MVCS - Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, HVH: huevos viables de helmintos, NMP: número más probable, N. E: No especifica.

Podemos mencionar la correlación entre los tres parámetros evaluados y la dosis de óxido de calcio aplicada que, para el parámetro huevos de helmintos se logró la remoción total (0 HVH/4 g lodo residual deshidratado) en la aplicación del T<sub>3</sub> (100 g de óxido de calcio), a diferencia del parámetro de *Escherichia coli* que logró la remoción en los T<sub>2</sub> (50 g) y T<sub>3</sub> (100 g) y en el caso de *Enterobacter aerogenes* donde se logró una remoción total de en el T<sub>3</sub> (100 g); lo que nos muestra que para una remoción y cumplimiento de la normativa vigente, no necesariamente coinciden las dosis aplicadas en los tratamientos con la cantidad de patógenos removidos establecidos como

parámetro de higienización. Los tres parámetros evaluados fueron comparados en cumplimiento del Decreto Supremo N° 015-2017 - MVCS. La Tabla 16 sintetiza de manera precisa la relación entre los tres parámetros microbiológicos evaluados: huevos viables de helmintos, *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes*. Esta visión conjunta permite apreciar la eficacia integral del tratamiento con óxido de calcio y cómo cada dosis influye de forma simultánea sobre distintos indicadores de calidad sanitaria del lodo residual. En el tratamiento control ( $T_0$ ), los valores iniciales son elevados en los tres parámetros: 258 HVH/4 g lodo residual deshidratado, 25 880 NMP/g lodo residual deshidratado de *Escherichia coli* y 245 000 NMP/g lodo residual deshidratado de *Enterobacter aerogenes*, lo que confirma que el lodo sin tratamiento representa un riesgo alto para la salud y el ambiente. Al aplicar 10 g de óxido de calcio ( $T_1$ ), se observa una reducción sustancial en todos los casos, pero aún fuera de los límites establecidos para lodo residual deshidratado Clase A por el Decreto Supremo N° 015-2017 - MVCS ( $< 1$  HVH/4 g lodo residual deshidratado y  $< 1$  000 NMP/g lodo residual deshidratado para *Escherichia coli*). Con 50 g de óxido de calcio ( $T_2$ ), los valores se reducen a 14 HVH/4 g lodo residual deshidratado, 41 NMP/g lodo residual deshidratado de *Escherichia coli* y 390 NMP/g lodo residual deshidratado de *Enterobacter aerogenes*, lo que ya cumple con el estándar normativo para los dos parámetros regulados. Sin embargo, es con 100 g ( $T_3$ ) donde se alcanza la remoción total en los tres indicadores, logrando un lodo residual deshidratado completamente higienizado y seguro para su uso agrícola sin restricciones. Esta correlación refuerza la idea de que el pH elevado, mantenido en niveles superiores a 12, es el principal factor de inactivación microbiana, y que la eficacia del tratamiento es consistente entre diferentes grupos de patógenos. Este análisis integrado confirma que la dosis de óxido de calcio debe seleccionarse no solo por su impacto individual, sino por su capacidad de garantizar la seguridad sanitaria global del producto final. Además, la presentación

conjunta de estos resultados facilita una evaluación más estratégica del tratamiento, permitiendo a las plantas de tratamiento elegir la dosis adecuada con base en objetivos sanitarios y de reaprovechamiento seguro. El exceso de lodos en la depuración que lleva el tratamiento de aguas residuales genera afectaciones a la salud y al medio ambiente, por los distintos componentes que posee el subproducto, estos tienen alto contenido en materia orgánica, metales pesados y microorganismos patógenos (Behnami et al., 2024). A nivel mundial del 7 % al 9 % de gases de efecto invernadero como el  $\text{CH}_4$  son generados por las aguas residuales, que son la quinta fuente más grande de emisiones de  $\text{CH}_4$  (Khabiri et al., 2022), en los que resultan lodos residuales como subproducto del tratamiento biológico de las aguas domésticas, que pueden llegar a causar impacto al ambiente y a la salud de la población; por tal motivo son considerados como residuos peligrosos (Martínez-Prado et al., 2011, como se citó en Sánchez et al., 2024). Los lodos residuales también albergan microorganismos patógenos, como bacterias, virus y parásitos, que pueden representar graves riesgos para la salud pública si no se eliminan o se reducen a niveles seguros (Drangert y Kjerstadius, 2023). Según los datos obtenidos, en la primera repetición, sin usar óxido de calcio se obtuvieron ciertos niveles de contaminantes como *Escherichia coli*, *Enterobacter aerogenes* y huevos viables de helmintos. Al aumentar la cantidad de óxido de calcio utilizada en las muestras de (10 g), (50 g) y (100 g), se observa una disminución progresiva en los niveles de estos contaminantes. Es necesario entender como mencionan Gutiérrez et al., (2014, como se citó en Patiño, 2024), que los lodos residuales requieren un proceso de tratamiento y estabilización de la fracción de materia orgánica que permita modificar sus características físicas, químicas microbiológicas y patogénicas en lodos residuales deshidratados con aptitudes para su reutilización como lodos residuales deshidratados en actividades agrícolas, forestales o recuperación de suelos. La selección del tratamiento para alcanzar la estabilización de los lodos depende de tres factores

fundamentales que son la disposición final, calidad y cantidad. Dentro de los procesos efectuados para estabilizar los lodos, se encuentran (Sánchez et al., 2020). Acorde con Trejos y Agudelo (2012, como se citó en Sánchez et al., 2024), quienes mencionan que por tal razón se justifica buscar alternativas adecuadas que permitan la reutilización de dichos residuos, teniendo en cuenta que una buena gestión de los lodos es primordial para el funcionamiento de cualquier instalación de depuración de aguas. La estabilización química se basa en la adición de agentes químicos para reducir la actividad biológica y estabilizar los lodos. Uno de los métodos comunes es la adición de cal (hidróxido de calcio) (Castillo, et al., 2020) o cal apagada (hidróxido de calcio tratado con agua) a los lodos. Se demostró que el tratamiento con óxido de calcio si era eficaz para la higienización de lodos y poder hacer un compost de buena calidad. Se identificaron los siguientes agentes patógenos: coliformes totales, coliformes fecales, huevos de helminto y salmonella, los resultados obtenidos fueron el 100 % de eliminación de estos agentes patógenos; no obstante, al realizar el composteo se logró obtener buenos resultados en el pH al estabilizar con residuos sólidos cítricos y el resultado óptimo de nitrógeno. Entonces podemos decir que el tratamiento con óxido de calcio en estas investigaciones de igual manera en nuestro tratamiento es muy efectivo, dependiendo la cantidad que se utilice para cada tratamiento. Teniendo como referencia tales resultados de estas investigaciones podemos decir que esto se debe principalmente a que la adición de óxido de calcio seca el lodo por el calor liberado en la reacción exotérmica de hidratación del óxido de calcio. Además de esto al agregar óxido de calcio a la muestra se eleva el pH y de esta manera higieniza el lodo destruyendo los macroorganismos y bacterias presentes, del mismo modo evita su crecimiento. Dentro de los procedimientos más empleados para tratar y/o disponer de los lodos generados por las PTAR, se encuentra la deshidratación, sin embargo, este solamente consigue una reducción del 20,0 % del volumen; otra metodología utilizada es la incineración,

mediante la cual se reduce el volumen hasta en un 80,0 % (Remis, 2011, como se citó en Patiño Jiménez, 2024). Estos lodos están constituidos por una gran concentración de material orgánico, permitiendo la presencia de microorganismos y otros contaminantes, lo que hace necesario su estabilización. Estos se presentan como líquidos que contienen concentraciones de sólidos entre un 0,5 % hasta un 10,0 % (Bermeo e Idrovo, 2014, como se citó en Patiño, 2024). Tal como nos menciona Patiño Jiménez (2024), las plantas de tratamiento de aguas residual doméstica enfocan sus esfuerzos tanto en el recurso hídrico, como en los subproductos que se puedan obtener en este proceso; como es el caso de los lodos residuales llegando a ser uno de los subproductos más importantes producidos en las PTAR. Realizar el análisis con los distintos métodos utilizados para la identificación de microorganismos con óxido de calcio en distintas dosificaciones permitió la reducción de microorganismos, tales como las bacterias Gram Positivas y Gram Negativas a los 6 días de su tratamiento. Estos resultados confirman que, si el pH se mantiene alto por más de 72 horas, aún sin cumplir el requisito de temperatura, es eficiente para obtener un lodo residual deshidratado que no genere riesgos ambientales y a la salud por microorganismos patógenos. el tratamiento alcalino de lodo residual deshidratado con óxido de calcio (CaO) es efectivo para la reducción de patógenos y disminución de humedad, aunque presenta desafíos en la formación de grumos y el mantenimiento de temperaturas elevadas. La estabilidad del pH es crucial para la efectividad del proceso (Sánchez et al., 2024). Para la presente investigación se realizó la higienización de lodos con el 20 % y 30 % de óxido de calcio, observando que en el segundo porcentaje los resultados mostraron una disminución en los parámetros biológicos. En el caso de la estabilización con óxido de calcio, esta ofrece cambios extensos, además de ventajas sobre estabilizaciones como la digestión aerobia. La estabilización con óxido de calcio logra que la humedad se reduzca del 10 al 12 % y que el contenido orgánico oscile entre el 4 y el 9 %. Sin

embargo, dichos resultados pueden variar de acuerdo con el contenido de óxido de calcio añadido. El proceso fisicoquímico, aunque reduce los organismos patógenos en los lodos, elimina malos olores y minimiza su potencial de descomposición, aumenta la masa total y la alcalinidad de las estructuras orgánicas (Cárdenas Torrado, 2022).

#### **4.2. Análisis físico-químico**

Se midieron los parámetros de pH y temperatura para el presente estudio; en las figuras 13 y 14, podemos apreciar el resultado para ambos en promedio de las diez repeticiones realizadas durante los cinco meses de los monitoreos con una frecuencia quincenal respectivamente, después de la aplicación de los tratamientos correspondientes (T<sub>0</sub>: 0 gramos de óxido de calcio, T<sub>1</sub>: 10 gramos de óxido de calcio, T<sub>2</sub>: 50 gramos de óxido de calcio y T<sub>3</sub>: 100 gramos de óxido de calcio) para el primer (1°) y quinto día (5°), para de esta forma evaluar el efecto de la óxido de calcio sobre estos parámetros. De esta manera se cumplió satisfactoriamente con el objetivo específico planteado de medir el pH y la temperatura del sustrato antes y después de la aplicación del óxido de calcio y evaluar los diversos resultados obtenidos luego de la aplicación del óxido de calcio en diversas proporciones para definir el porcentaje de remoción de huevos de helmintos, *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes* de los lodo residual deshidratado en la PTAR ciudad de Celendín.

##### **4.2.1. Resultados del pH**

En la tabla 17, se aprecian los datos obtenidos en las mediciones de campo para el parámetro de pH, con resultados realizados previos al día de envío de las muestras, para sus análisis microbiológicos al laboratorio en la ciudad de Cajamarca, Laboratorio de Análisis microbiológico BioMic SRL. Para esto se llevó a cabo la medición el primer día (1°) y el quinto día (5°) después de la aplicación de los respectivos tratamientos con óxido de calcio (CaO) (T<sub>0</sub>: 0 gramos de óxido

de calcio, T<sub>1</sub>: 10 gramos de óxido de calcio, T<sub>2</sub>: 50 gramos de óxido de calcio y T<sub>3</sub>: 100 gramos de óxido de calcio) en 500 g en peso de lodo residual deshidratado.

**Tabla 17**

*Valores del pH al primer y quinto día de aplicación de óxido de calcio.*

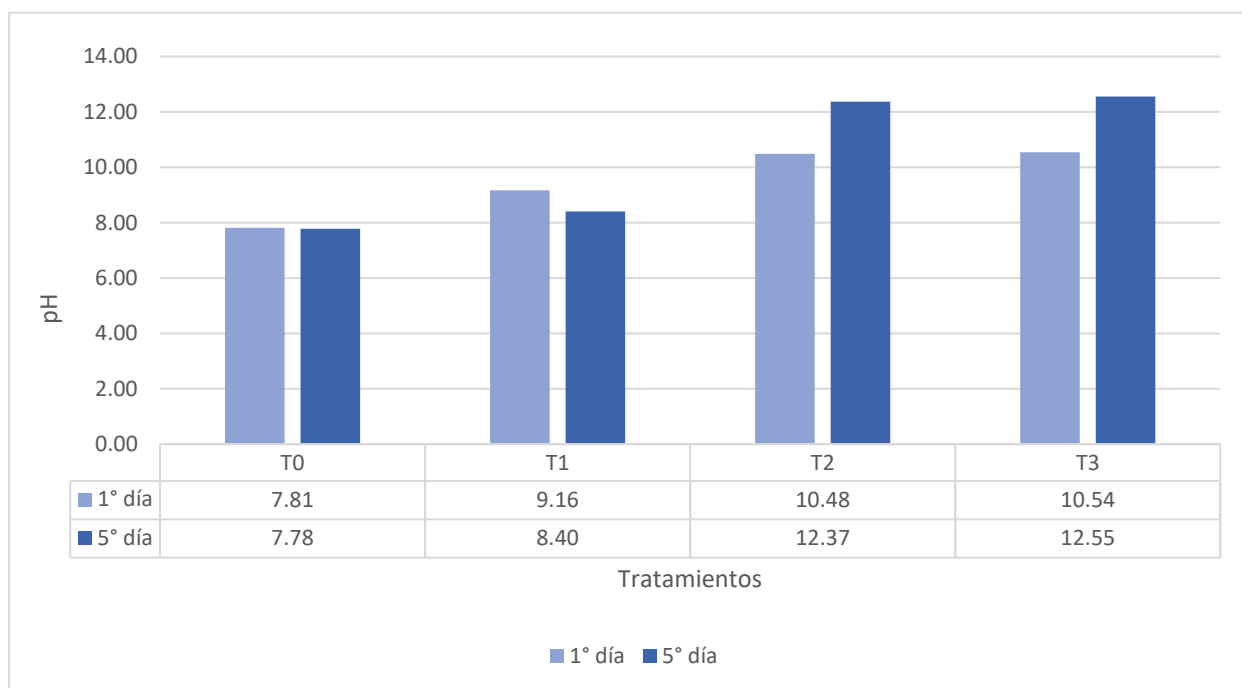
| Repetición | Fecha      | Día | Tratamientos   |                |                |                |
|------------|------------|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|
|            |            |     | T <sub>0</sub> | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> |
| 1°         | 4/02/2024  | 1°  | 8.78           | 11.9           | 12.01          | 12.34          |
|            |            | 5°  | 7.69           | 8.03           | 12.36          | 12.5           |
| 2°         | 5/02/2024  | 1°  | 7.04           | 8.15           | 12.23          | 11.9           |
|            |            | 5°  | 7.91           | 7.96           | 12.48          | 12.51          |
| 3°         | 1/03/2024  | 1°  | 7.38           | 7.25           | 7.4            | 7.33           |
|            |            | 5°  | 7.87           | 8.63           | 12.88          | 12.95          |
| 4°         | 5/03/2024  | 1°  | 7.23           | 7.26           | 7.18           | 7.53           |
|            |            | 5°  | 8.42           | 8.49           | 12.37          | 12.52          |
| 5°         | 15/03/2024 | 1°  | 7.45           | 7.41           | 7.21           | 7.22           |
|            |            | 5°  | 7.31           | 7.8            | 12.29          | 12.58          |
| 6°         | 19/03/2024 | 1°  | 8.2            | 7.45           | 8.02           | 7.79           |
|            |            | 5°  | 8.16           | 8.72           | 12.41          | 12.54          |
| 7°         | 30/03/2024 | 1°  | 8.89           | 12.1           | 12.78          | 12.9           |
|            |            | 5°  | 7.23           | 10.1           | 12.52          | 12.55          |
| 8°         | 3/04/2024  | 1°  | 7.94           | 8.96           | 12.57          | 12.78          |
|            |            | 5°  | 7.59           | 7.92           | 11.68          | 12.48          |
| 9°         | 12/04/2024 | 1°  | 7.6            | 10.57          | 12.79          | 12.88          |
|            |            | 5°  | 7.76           | 8.19           | 12.35          | 12.44          |
| 10°        | 16/04/2024 | 1°  | 7.6            | 10.57          | 12.64          | 12.7           |
|            |            | 5°  | 7.89           | 8.2            | 12.35          | 12.46          |
| Promedio   |            | 1°  | 7.81           | 9.16           | 10.48          | 10.54          |
|            |            | 5°  | 7.78           | 8.40           | 12.37          | 12.55          |

*Nota:* La tabla nos muestra los valores de la medición de pH para los cuatro tratamientos realizados en diez repeticiones, del 1° y 5° día de aplicada el óxido de calcio.

En la figura 13 se muestra un comportamiento muy parecido durante las diez repeticiones; oscilando en promedio de los diez tratamientos para el primer (1°) y quinto (5°) día, de la siguiente manera: Tratamiento 0 (T<sub>0</sub>): entre 7.81 y 7.78, Tratamiento 1 (T<sub>1</sub>): entre 9.16 y 8.40, Tratamiento 2 (T<sub>2</sub>): entre 10.48 y 12.37 y Tratamiento 3 (T<sub>3</sub>): entre 10.54 y 12.

**Figura 13**

*Promedio de los valores del pH al primer y quinto día de aplicación de óxido de calcio.*



*Nota:* Promedio total de pH para los cuatro tratamientos, del 1° y 5° día de aplicada el óxido de calcio.

El comportamiento del pH, según los datos de la Tabla 17 y la Figura 13, confirma el papel fundamental que desempeña la alcalinidad en la higienización de lodo residual deshidratado mediante la adición de óxido de calcio. En el tratamiento control (T<sub>0</sub>), los valores de pH se mantuvieron en promedio en 7.81 el primer día y 7.78 al quinto día, rango característico de un medio neutro que no ejerce un efecto desinfectante significativo. Con la adición de 10 g de óxido

de calcio ( $T_1$ ), se alcanzó un pH promedio inicial de 9.16, descendiendo ligeramente a 8.40 al quinto día. Aunque este incremento favorece la reducción de la carga microbiana, los valores no alcanzan el nivel óptimo para una inactivación completa de patógenos, según lo indicado en referencias técnicas que señalan pH superiores a 12 como ideales para una higienización eficaz. En el tratamiento con 50 g ( $T_2$ ), el pH promedio se elevó a 10.48 el primer día y alcanzó 12.37 al quinto día, manteniéndose en el rango de fuerte alcalinidad que asegura la desnaturalización de proteínas y la inactivación de microorganismos. El resultado más destacado se observó en el tratamiento con 100 g ( $T_3$ ), con valores de pH de 10.54 iniciales y 12.55 al quinto día, garantizando así condiciones óptimas para la remoción total de *Escherichia coli*, huevos de helmintos y *Enterobacter aerogenes*. La Figura 13 evidencia claramente la correlación entre la dosis de óxido de calcio y el incremento del pH, siendo este último un factor determinante para cumplir con el Decreto Supremo N° 015-2017 – MVCS en lo relativo a la obtención de lodos residuales deshidratados Clase A. En mi opinión, mantener el pH en niveles  $\geq 12$  por un tiempo suficiente es clave para garantizar la inocuidad sanitaria y la viabilidad de la reutilización agrícola de los lodo residual deshidratado.

Por lo tanto, podemos mencionar que el parámetro de pH medido en el lodo residual deshidratado de la PTAR de la ciudad de Celendín, después de un proceso de deshidratación con radiación solar en los lechos de secado con la aplicación de óxido de calcio del 1° día, muestra un pH que va en ascenso del  $T_0$  al  $T_3$  desde el valor 7.81 hasta 10.54; y para el 5° día muestra un pH con valores también ascendentes  $T_0$  al  $T_3$  desde 7.78 hasta 12.55.

Lo cual coincide con lo mostrado por Huanca et al. (2022) quienes lograron elevar el pH a un valor de 12 por un tiempo de 72 horas ya que el óxido de calcio (óxido de calcio) es un compuesto básico que se utiliza muy a menudo para este fin, lo cual tiene un efecto de dificultar

el medio de vida de determinados patógenos entre ellos, los tres que se tuvo en cuenta para el presente trabajo de investigación. Además, Sánchez Castillo (2021) nos indica que la alcalinización permitió eliminar gran parte de los patógenos, pero no contribuyó a la deshidratación del lodo. El secado solar durante 17 días junto con alcalinización al quinto día de secado fue el tratamiento que mostró los resultados más favorables en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

Esto a su vez es conveniente en el sentido de que el Decreto Supremo N° 015-2017 - MVCS (MINAM, 2017) en su Artículo 20.- Prohibiciones para la aplicación de lodos residuales deshidratados de Clase A y de Clase B) menciona que no pueden ser aplicados los lodo residual deshidratado en suelos ácidos con un valor inferior a pH 5, y en el presente estudio después de los tratamientos aplicados el pH es superior a este valor. La estabilización alcalina del lodo residual deshidratado de la PTARD con óxido de calcio T<sub>2</sub> (Óxido de calcio 8 % + Lodo 92 %) y T<sub>3</sub> (Óxido de calcio 12 % + Lodo 88 %) y T<sub>6</sub> (Polvillo Rotax 30 % + Lodo 70 %) logró elevar el pH a 12 unidades por un periodo mayor a 72 horas y manteniéndolo cercano a 12 unidades durante todo el ensayo, lo que garantizó una eficiente reducción de microorganismos patógenos y obtención de un lodos residuales deshidratados tipo A (Huanca et al., 2022).

Según lo descrito por Rongwong y Sairiam (2020), se dice que los valores con pH alcalino o básico, aumentan la concentración del NH<sub>3</sub> (amoníaco), convirtiendo en tóxico el medio para dichos organismos. Dependiendo de la naturaleza de los lodos y el tratamiento deseado, es posible que se requiera el ajuste del pH. Esto se logra mediante la adición de agentes químicos, como ácidos o bases, para alcanzar el rango de pH óptimo para el proceso de tratamiento específico (Gutiérrez Espinoza, 2022).

El óxido de calcio eleva el pH de los lodos, lo que inhibe la actividad microbiana y reduce la producción de olores (Saldaña y Gámez, 2022). Además, el óxido de calcio también puede ayudar a mejorar la estructura y consistencia de los lodos residuales deshidratados.

Así mismo Sánchez et al. (2024), concluye que al mantener el pH por encima de 12 unidades sin tener en cuenta la variedad de temperatura, se evidencia la disminución de humedad con las dosificaciones proporcionadas a cada tratamiento, observándose que la proporción de 45 % es quien tiene mejor eficacia comparada con las demás.

#### ***4.2.2. Resultados de la temperatura***

Los datos obtenidos en las mediciones de campo para el parámetro de temperatura en grados centígrados (°C) se puede observar en la tabla 21, donde se ven los valores de este parámetro que fueron tomados previamente antes de ser enviadas las muestras, para su análisis microbiológico al laboratorio BioMic SRL. en la ciudad de Cajamarca, por ello se llevó a cabo la medición el primer día (1°) y el quinto día (5°) después de la aplicación de los respectivos tratamientos con óxido de calcio (CaO) (T<sub>0</sub>: 0 gramos de óxido de calcio, T<sub>1</sub>: 10 gramos de óxido de calcio, T<sub>2</sub>: 50 gramos de óxido de calcio y T<sub>3</sub>: 100 gramos de óxido de calcio).

Además, se puede observar los valores promedios de los valores obtenidos en los tratamientos respectivos para el primer día (1°) y el quinto día (5°) después de la aplicación de los respectivos tratamientos con óxido de calcio (CaO).

**Tabla 18***Valores de temperatura (°C) al primer y quinto día de aplicación de óxido de calcio.*

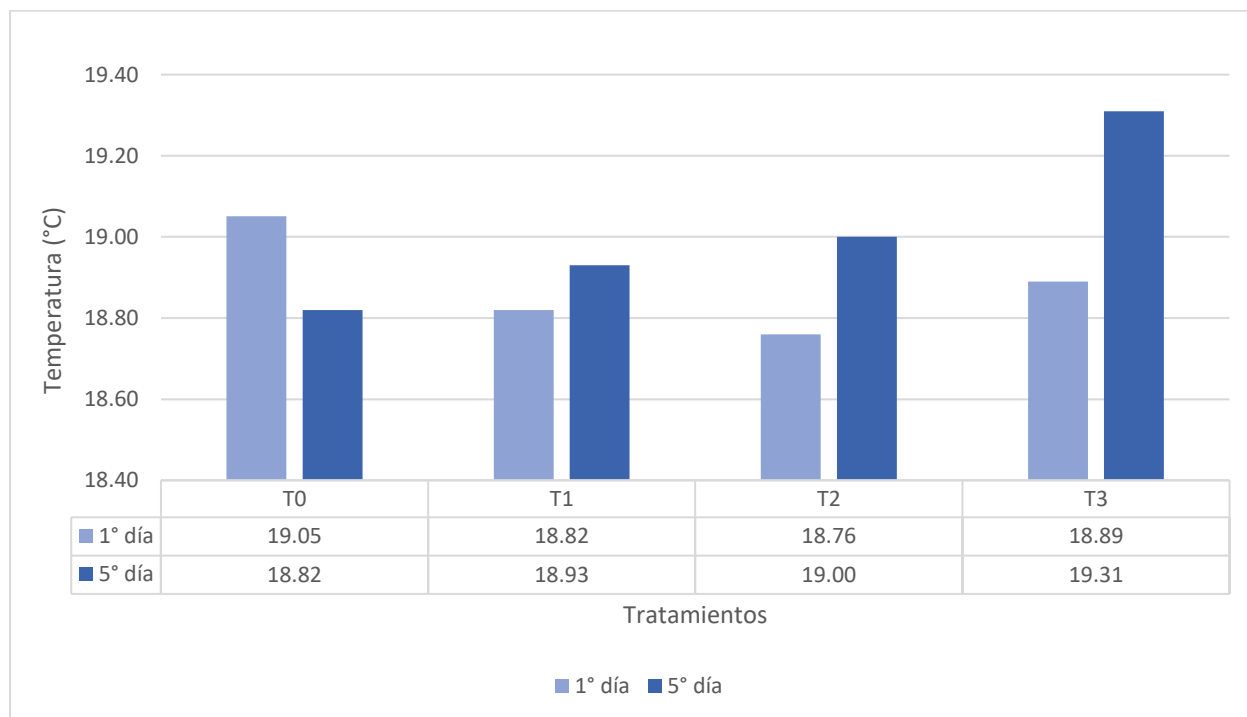
| Repetición | Fecha      | Día | Tratamientos   |                |                |                |
|------------|------------|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|
|            |            |     | T <sub>0</sub> | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> |
| 1°         | 4/02/2024  | 1°  | 20.10          | 20.00          | 19.46          | 20.00          |
|            |            | 5°  | 19.00          | 19.30          | 19.50          | 19.70          |
| 2°         | 5/02/2024  | 1°  | 20.21          | 18.90          | 19.04          | 19.00          |
|            |            | 5°  | 19.00          | 19.30          | 19.70          | 19.90          |
| 3°         | 1/03/2024  | 1°  | 18.40          | 18.50          | 17.90          | 18.00          |
|            |            | 5°  | 18.00          | 17.90          | 17.40          | 18.30          |
| 4°         | 5/03/2024  | 1°  | 17.60          | 17.60          | 17.50          | 17.60          |
|            |            | 5°  | 17.80          | 18.10          | 18.10          | 18.30          |
| 5°         | 15/03/2024 | 1°  | 18.00          | 17.90          | 17.90          | 18.00          |
|            |            | 5°  | 18.10          | 18.20          | 18.50          | 18.20          |
| 6°         | 19/03/2024 | 1°  | 18.00          | 17.80          | 17.80          | 17.90          |
|            |            | 5°  | 17.00          | 17.20          | 17.40          | 18.40          |
| 7°         | 30/03/2024 | 1°  | 20.20          | 20.30          | 19.90          | 20.00          |
|            |            | 5°  | 20.10          | 20.60          | 19.50          | 20.10          |
| 8°         | 3/04/2024  | 1°  | 20.20          | 19.80          | 19.60          | 19.90          |
|            |            | 5°  | 20.10          | 20.00          | 20.10          | 20.50          |
| 9°         | 12/04/2024 | 1°  | 18.70          | 18.90          | 19.30          | 19.10          |
|            |            | 5°  | 18.70          | 18.90          | 19.30          | 19.40          |
| 10°        | 16/04/2024 | 1°  | 19.10          | 18.50          | 19.20          | 19.40          |
|            |            | 5°  | 20.40          | 19.80          | 20.50          | 20.30          |
| Promedio   |            | 1°  | 19.05          | 18.82          | 18.76          | 18.89          |
|            |            | 5°  | 18.82          | 18.93          | 19.00          | 19.31          |

*Nota:* La tabla nos muestra los valores de la medición de la temperatura (°C) para los cuatro tratamientos realizados en diez repeticiones, del 1° y 5° día de aplicada el óxido de calcio.

Respecto a los resultados del parámetro temperatura, se puede ver en la figura 14, que no existe un patrón específico de comportamiento como en el caso del pH (ascendente), se muestran datos en promedio de los tratamientos  $T_0$  al  $T_3$  que van desde 18.76 hasta 19.05 para el primer (1°) día y de 18.82 hasta 19.31 para el quinto (5°) día, en ambos casos no hay una variación significativa mayor a un grado centígrado (1°). En promedio de las diez repeticiones para el primer (1°) y quinto (5°) día, a continuación, se muestran los resultados en grados centígrados (°C) para las cada uno de los cuatro (4) tratamientos aplicados: Tratamiento 0 ( $T_0$ ): entre 18.82 y 19.05, Tratamiento 1 ( $T_1$ ): entre 18.82 y 18.93, Tratamiento 2 ( $T_2$ ): entre 18.76 y 19.00, y el Tratamiento 3 ( $T_3$ ): entre 18.89 y 19.31.

**Figura 14**

*Valores promedio de temperatura (°C) al primer y quinto día de aplicación de óxido de calcio.*



*Nota:* En la figura se puede apreciar el promedio total de temperatura para los cuatro tratamientos, del 1° y 5° día de aplicación del óxido de calcio.

El análisis de la Tabla 18 y la Figura 14 muestra que la temperatura del sustrato no experimentó variaciones significativas tras la aplicación de óxido de calcio, manteniéndose en un rango estrecho tanto en el primer como en el quinto día de medición. En el tratamiento control ( $T_0$ ), el promedio fue de 19.05 °C al primer día y 18.82 °C al quinto, evidenciando la estabilidad térmica del material sin intervención. Con la adición de 10 g de óxido de calcio ( $T_1$ ), la temperatura media inicial fue de 18.82 °C y ligeramente superior (18.93 °C) al quinto día. En el tratamiento con 50 g ( $T_2$ ), los valores promedios se situaron en 18.76 °C y 19.00 °C respectivamente, mientras que en 100 g ( $T_3$ ) se registraron 18.89 °C y 19.31 °C. Estas variaciones son mínimas y no permiten atribuir a la temperatura un papel relevante en la inactivación microbiana. La Figura 14 refleja esta estabilidad térmica, indicando que la higienización observada en los otros parámetros (helminthos, *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes*) no estuvo asociada a un incremento térmico significativo, sino principalmente al aumento del pH generado por la reacción del óxido de calcio con la humedad del lodo. Esto concuerda con lo dispuesto por el Decreto Supremo N° 015-2017 - MVCS, donde para lodos residuales deshidratados Clase A no se exige un umbral térmico específico, pero sí condiciones químicas que aseguren la eliminación de patógenos. Estos resultados evidencian que la eficacia del tratamiento se sustenta en la acción química y no en la térmica. No obstante, el registro sistemático de la temperatura sigue siendo importante para descartar procesos de degradación indeseada y asegurar la estabilidad del lodo residual deshidratado durante su almacenamiento o aplicación en suelos agrícolas. Si bien es cierto la normativa peruana vigente (Decreto Supremo N° 015-2017 - MVCS) no establece un valor específico para este parámetro; se ha considerado ya que, las bajas temperaturas favorecen la supervivencia de las bacterias en un suelo a medida que la temperatura aumenta, el grado de supervivencia de las bacterias en el suelo tienden a disminuir.

Después del primer día (1°) de la aplicación de los tratamientos, los valores de la temperatura disminuyeron hasta el quinto día (5°) para el  $T_0$ , luego se incrementaron los valores de temperatura para los demás tratamientos ( $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$ ) pero en un grado centígrado (1 °C). En la termofilización, los lodos residuales se calientan a temperaturas elevadas (generalmente entre 50 °C y 70 °C) durante un período de tiempo específico para eliminar los microorganismos patógenos, esta digestión, implica la exposición de los lodos residuales a oxígeno y altas temperaturas para descomponer la materia orgánica (Manjarrés et al., 2021).

El óxido de calcio es un producto que comercialmente se encuentra principalmente en dos presentaciones: óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y cal hidratada ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), estos productos generan un aumento de la temperatura y producen iones hidróxido que aumentan el pH (Quiroz y Costa, 2016, como se citó en Castillo et al., 2020). El comportamiento de este parámetro tiene influencia sobre la presencia o ausencia de patógenos y otros microorganismos presentes en aguas y lodos residuales, De modo que esta propiedad ejerce una gran influencia en los mecanismos de la cinética química y biológica requeridos para que se desarrollen las distintas etapas del proceso de tratamiento (Romero, 2004, como se citó en Patiño et al. 2024).

La adición de óxido de calcio aumentó la temperatura durante el día de aplicación del alcalinizante (46 °C y 50 °C), siendo la proporción de 45 % la responsable de los mayores valores; no obstante, las temperaturas elevadas no permanecieron durante el tiempo mínimo recomendado por la EPA (Velasco et al., 2019, como se citó en Sánchez et al., 2024).

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES

1. Se logró remover la concentración para los tres patógenos estudiados: huevos de helmintos, *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes*, y llegando a una remoción total (100 %) de los tres patógenos con la aplicación del T<sub>3</sub>: 100 g peso de óxido de calcio en 500 g de lodo residual deshidratado después de cinco días de contacto.
2. Se logró la remoción total de los huevos de helmintos (0 HVH/ 4 g lodo residual deshidratado), con valores decrecientes después de cinco días de contacto con óxido de calcio en el tercer tratamiento (T<sub>3</sub>: 100 g de óxido de calcio en 500 gramos de lodo residual deshidratado), cumpliendo con el límite establecido por la normativa nacional vigente (Decreto Supremo N° 015-2017 - MVCS) es de < 1 HVH/4 g de lodo residual deshidratado.
3. Se confirmó la remoción total de *Escherichia coli* (0 NMP/1 g lodo residual deshidratado), con la aplicación del tercer tratamiento de nuestra investigación (T<sub>3</sub>: 100 g de óxido de calcio en 500 gramos de lodo residual deshidratado), y una remoción parcial (41 NMP/1 g lodo residual deshidratado) con el T<sub>2</sub>, (50 gramos de óxido de calcio en 500 gramos de lodo residual deshidratado), cumpliendo con el límite establecido por la normativa nacional vigente (Decreto Supremo N° 015-2017 - MVCS) es de <1000 NMP/1 g de lodo residual deshidratado.

4. Se logró la remoción total de *Enterobacter aerogenes* (0 NMP/1 g lodo residual deshidratado), con la aplicación del tercer tratamiento (T<sub>3</sub>: 100 g de óxido de calcio en 500 g de lodo residual deshidratado), en este caso no se hace referencia del valor de remoción de este patógeno en la normativa nacional vigente.
5. Para los tres parámetros evaluados: huevos de helmintos, *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes*; se logró la remoción después de cinco días de contacto con óxido de calcio para el T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub> con valores para huevos de helmintos: 258, 80, 14 y 0 (HVH/ 4 g lodo residual deshidratado) respectivamente, para *Escherichia coli*: 25880, 5972, 41 a 0 (NMP/1 g lodo residual deshidratado) respectivamente, y para *Enterobacter aerogenes*: 245000, 60830, 390 y 0 (NMP/1 g lodo residual deshidratado) respectivamente. Apreciándose que para los tres parámetros existe una remoción total en el T<sub>3</sub> (100 g de óxido de calcio en 500 g de lodo residual deshidratado).

## CAPÍTULO VI:

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade Farías, I. J. y Solórzano Acebo, D. C. (2021). *Aprovechamiento de Lodos de la Planta de Aguas Residuales del Cantón El Carmen como Lodos residuales deshidratados para el Sector Forestal*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López].

Plaza-Merchán, P. M. J. (2023). *Análisis de la variabilidad de la temperatura superficial del mar y su impacto regional (informe/tesis técnica)*. Repositorio Universidad Agraria / informe regional. Recuperado de repositorio universitario.

Intra, J., Carcione, D., Sala, R. M., Siracusa, C., Brambilla, P., & Leoni, V. (2023). *Antimicrobial resistance patterns of Enterobacter cloacae and Klebsiella aerogenes strains isolated from clinical specimens: A twenty-year surveillance study*. *Antibiotics*, 12(4), 775. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12040775>

Anderson, R. E. V., et al. (2023). *Characterization of Escherichia coli and Other Enterobacterales Resistant to Extended-Spectrum Cephalosporins*. *Applied and Environmental Microbiology*, 89, e01869-22. <https://doi.org/10.1128/aem.01869-22>

- Velázquez-Chávez, L. J. (2022). *Influencia de la contaminación del agua y el suelo: revisión y diagnóstico (artículo de revisión)*. Revista/Repositorio (SciELO México). Recuperado de <https://www.scielo.org.mx>
- Mahapatra, S., Ali, M. H., Samal, K., & Moulick, S. (2022). Diagnostic and treatment technologies for detection and removal of helminth in wastewater and sludge. *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102310. Citado en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102310>
- Maurelli, M. P., Alves, L. C., Aggarwal, C. S., Cociancic, P., Levecke, B., Cools, P., Montresor, A., Ianniello, D., Gualdieri, L., Cringoli, G., & Rinaldi, L. (2021). *Ascaris lumbricoides* eggs or artefacts? A diagnostic conundrum. *Parasitology*, 148(13), 1554–1559. Citado en: <https://doi.org/10.1017/S0031182021001256>
- Ryoo, S., Jung, B. K., Hong, S., Shin, H., Song, H., Kim, H. S., Ryu, J. Y., Sohn, W. M., Hong, S. J., Thi Thi Htoon, H., Htay Htay Tin, & Chai, J. Y. (2023). Standard- and large-sized eggs of *Trichuris trichiura* in the feces of schoolchildren in the Yangon Region, Myanmar: Morphological and molecular analyses. *Parasites, Hosts and Diseases*, 61(3), 317–324. Citado en: <https://doi.org/10.3347/PHD.23059>
- Sohn, W. M., y Chai, J. Y. (2024). Practical guide for the diagnosis of helminth ova in stools. *Annals of Clinical Microbiology*, 27(2), 51–66.
- Ward, P., Dahlberg, P., Lagatie, O., Larsson, J., Tynong, A., Vlaminck, J., et al. (2022). Affordable artificial intelligence-based digital pathology for neglected tropical diseases: A proof-of-concept for detection of soil-transmitted helminths and *Schistosoma mansoni* eggs in Kato-Katz stool thick smears. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 16(6), e0010500. Citado en: <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0010500>

- Zarate Rodríguez, G. (2022). Mejoramiento de la obtención de Óxido de Calcio en la empresa Calquipa S.A.C. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]
- Huang, X., et al. (2024). Investigating the dewatering efficiency of sewage sludge with optimized ratios of electrolytic manganese residue components. [Journal name if available].
- Orozco, L. (2025). Lodos residuales: sus características y su impacto en la sociedad. Recuperado de <https://www.oroicolab.info/lodos-residuales-sus-caracteristicas-y-su-impacto-en-la-sociedad>
- Metcalf & Eddy, Inc. (2022). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento y reutilización (6.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill Education.
- Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. L. (2021). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (6th ed.). McGraw-Hill Education
- Véliz Lorenzo, E., Llanes Ocaña, J. G., Asela Fernández, L., y Bataller Venta, M. (2020). Reúso de aguas residuales domésticas para riego agrícola. Valoración crítica. Revista CENIC Ciencias Biológicas, 40(1), 35-44. Citado en; <https://revista.cnicec.org/index.php/RevBiol/article/view/715>
- Behnami, A., Zoroufchi, K., Pourakbar, M., Yeganeh, M., Esrafil, A., y Gholami, M. (2024). Biosolids, an important route for transporting poly- and perfluoroalkyl substances from wastewater treatment plants into the environment: A systematic review. Science of The Total Environment, 925, 171559. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171559>
- Betancur, J., Sánchez, S., Rodríguez, D. C., Peñuela, G. (25 de setiembre de 2017). Evaluación del efecto del peróxido de hidrógeno y estabilización alcalina con cal en el manejo de lodos reactivos e infecciosos. Vol.12, No.2

- Bina, B.; Movahedian, H.; Kord, I. (2004). The Effect of Lime Stabilization on the Microbiological Quality of Sewage Sludge. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 1, pp. 34–38.
- Castro, C. P., Henríquez, O., Freres, R. (2007). Posibilidades de aplicación de lodos o lodos residuales deshidratados a los suelos del sector norte de la Región Metropolitana de Santiago. *Revista de Geografía Norte Grande*, 37: 35-45 (2007).
- Castellanos-Rozo, J., Galvis-López, J., Merchán-Castellanos, N., Manjarres-Hernández, E., Rojas, A. (2020). Assessment of two sludge stabilization methods in a wastewater treatment plant in Sotaquirá, Colombia. *Universitas Scientiarum*, 25(1), 17-36.
- Castillo Sánchez J.G, Balarezo Saltos L.D, Vines Obando M.B, Zambrano Rizo, (2020). *Alternativas en la estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Revista RIEMAT, enero-junio 2020. volumen 5. número 1. art 4.
- Cárdenas Torrado, G. (2022). *Alternativas de gestión de lodos residuales. Caso de estudio: Laguna de estabilización de Ábrego, Norte de Santander*. [Tesis de posgrado, Universidad de Antioquia].
- Cerón, O.; Millán, S.; Espejel, F.; Rodríguez, A.; y Ramírez, R. (2006). *Aplicación de lodos de plantas potabilizadoras para elaborar materiales de construcción*. México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Chuchón Martínez, S. A., Aybar Escobar, C. A. (2008). Evaluación de la capacidad de remoción de bacterias coliformes fecales y Demanda Bioquímica de Oxígeno de la planta de

- tratamiento de aguas residuales “La Totorá”, Ayacucho, Perú. *Revista Ecología Aplicada*, 7(1–2), 165–171.
- Drangert, J.O., y Kjerstadius, H. (2023). *Recycling – The future urban sink for wastewater and organic waste. City and Environment Interactions*, 19, 100104.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100104>
- Egamberdieva, D., Botir, H., Hashem, A., y Abd-Allah, E. F. (2024). "Characterization of salt tolerant *Enterobacter hormaechei* strain associated with tomato root grown in arid saline soil". *J. Pure Appl. Microbiol*, Vol. 8(5), pp. 4231-4239.
- Fragoso-Castilla, P. J., Rubiano, L. A., y Kerguelen, J. J. (2021). *Análisis de variables fisicoquímicas en el proceso de remoción de coliformes en el sistema de lagunas de oxidación, Salguero, Valledupar (Colombia)*. In *Información tecnológica* (Vol. 32, pp. 113–122). Scielocol.
- García-Fraile, P., Carro, L., Robledo, M., Ramírez-Bahena, M., Flores-Félix, J., Fernández, M., Mateos, P., Rivas, R., Igual, J., Martínez-Molina, E., Peix, A. and Velázquez, E. (2012). "Rhizobium promotes non-legumes growth and quality in several production steps: Towards a biofertilization of edible raw vegetables healthy for humans", *PLoS ONE*, Vol. 7(5).
- Gerba, C. P. (1996) *Microbial pathogens in municipal solid waste*. In: PALMISANO, a. c; BARLAZ, M. A. (eds.) *Microbiology of solid waste*. New York: CRC Press, 1996

- Gheethi Adel A., Abdel-Monem, M. y Kadir, M. Eliminación de bacterias patógenas de efluentes tratados con aguas residuales y lodos residuales deshidratados para fines agrícolas. *Appl Water Sci* 8, 74 (2018). <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0698-6>
- Guadarrama, B.M. y Galván, F.A., (2015). *"Impacto del uso de agua residual en la agricultura"*. *Revista Iberoamericana de las ciencias biológicas y agropecuarias*, Vol. 4.
- Haldeman, M., Nolan, M., Ng'habi, K. (2020). *Human hookworm infection: Is effective control possible? A review of hookworm control efforts and future directions*. *Acta Tropica*, 201.
- Huanca Chambi, G., Pineda Tapia, J. L., Deza Ramos, T., y Salas Sucaticona, R. (2022). Estabilización alcalina de lodos de PTARD para obtener biosólido tipo A. Ñawparisun – *Revista de Investigación Científica de Ingenierías*, 3(4), 25-32.
- Hernández Herrera, J. M. (2004). Uso de lodos residuales procedentes de la ciudad de Durango y su efecto en la productividad y concentración de metales en sorgo forrajero [Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Nuevo León].
- Jiménez, B., Barrios, J. A., y Maya, C. (2000). Estabilización alcalina de lodos generados en un tratamiento primario avanzado. XII Congreso Nacional 2000 Ciencia y Conciencia Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y ciencias Ambientales (1), 804-816.
- Khabiri, B., Ferdowsi, M., Buelna, G., Jones, J. P., y Heitz, M. (2022). *Bioelimination of low methane concentrations emitted from wastewater treatment plants: a review*. *Critical Reviews in Biotechnology*, 42(3), 450–467. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1940830>

Kumate, J. (1993). Manual De Infectología. Edición11. Editor: Fco. Méndez Cervantes, 1990. N° páginas 65.

Limón Macías, J. G. (2013). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso? Recuperado el 08 de julio del 2013, de:  
[http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc\\_ingreso\\_gualberto\\_limón\\_trabajo\\_de\\_ingreso.pdf](http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_limón_trabajo_de_ingreso.pdf)

Malcheva, B. Z., Petrov, P. G. y Stefanova, V. V. (2022). Control microbiológico en la descontaminación de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales. *Procesos*, 10(2), 406. <https://doi.org/10.3390/pr10020406>

Manjarrés Hernández, E. H., Castellanos Roza, J. M., Galvis López, J. A., y Merchán Castellanos, N. A. (4 de diciembre de 2018). Uso de lodos residuales deshidratados en Colombia: métodos de estabilización y aplicaciones a nivel agrícola. *Revista I3+*, 4(1), 9 - 28 p.p

Marín Ocampo, A. y Osés Pérez, M. (2013). *Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales con el Proceso de Lodos Activados*. Jalisco, México: Editorial CEA Jalisco.

Metcalf y Eddy, I. (1995). Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización. Editorial Mac Graw Hill / Interamericana de España, S. A.

Meléndez, C. y Pérez, J. (2007). Procesos para el Tratamiento Biológico de Aguas Residuales Industriales. La Habana, Cuba: Editorial Universitaria.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS] (2017). Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales D.S N° 015-2017.

Ospina López, F. A., Rodríguez González, A. y González Guzmán, J. M. (2017).

Organización Mundial de la Salud [OMS] (2011). Guías para la calidad del agua de consumo humano. ISBN 978-92-4- 354995-8

Pecson, B. M.; Barrios, J. A.; Jiménez, J. A. y Nelson, K. L. 2007. *The effects of temperature, pH, and ammonia concentration on the inactivation of ascaris eggs in sewage sludge*. Water Res. 41(13):2893 - 2902.

Pérez Lomas, A. L. (2009). *Bases edafológicas para la correcta utilización de un compost de lodos de aguas residuales urbanas, como enmienda orgánica* [Tesis doctoral, Universidad de Granada].

Ramalho, R. S. (2021). Tratamiento de aguas residuales. Reverte.

Romero Rojas, J. A. (2008). Teoría y principios de diseño. Tratamiento de aguas residuales. 3ra edición. *Editorial escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia. 127-134 pp.*

Rojas Morales, J. L., Gutiérrez González, E. C., y Colina Andrade, G. J. (2016). Obtención y caracterización de carbón activado obtenido de lodos de plantas de tratamiento de agua residual de una industria avícola. *Revista. Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XVII (número 4), octubre-diciembre 2016: 453-462 ISSN 1405-7743 FI-UNAM*

- Rongwong Wichitpan y Sairiam Sermpong. (2020a). *A modeling study on the effects of pH and partial wetting on the removal of ammonia nitrogen from wastewater by membrane contactors*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 8(5), 104240.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104240>
- Ruiz, J.; Ramírez, N. y Arroyave, O. *Determinación de concentraciones inhibitorias mínimas a algunos antibióticos de las bacterias aisladas de glándula mamaria bovina en San Pedro de los Milagros, Antioquia*. Rev. Col. Cien. Pec. 14: 141-152. 2001.
- Saldaña Escorcía, R., & Castillo Gámez, J. K. (2021). *Alternativas para la estabilización de lodos generados en estaciones depuradoras de aguas residuales desde un enfoque sistémico: una revisión*. In Revista de Investigación Agraria y Ambiental (Vol. 13, Issue 1, pp. 175–194). <https://doi.org/10.22490/21456453.4504>
- Sánchez, J. G. C., Saltos, L. D. B., Obando, M. B. V., y Rizo, H. A. Z. (2020). *Alternativas en la estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Revista de Investigaciones En Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT ISSN: 2588-0721, 5(1), 23–27.
- Silva Leal, J.; Bedoya Ríos, D.; Torres Lozada, P. (2013). *Efecto del secado térmico y el tratamiento alcalino en las características microbiológicas y químicas de lodos residuales deshidratados de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas*. Revista Quim. Nova, Vol. 36, No. 2, 207-214, 2013

Torres, P., Madera, C., y Silva, J. (2009). Mejoramiento de la Calidad Microbiológica de Lodos residuales deshidratados generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas. *Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 11, p. 21-37.*

Torres Lozada, P., Madera, C. A., y Silva Leal, J. A. (2009). Eliminación de patógenos en lodos residuales deshidratados por estabilización alcalina. *Revista Acta Agronómica (3), 197-205.*

Vélez Zuluaga, J. A. (2007). Los lodos residuales deshidratados : ¿una solución o un problema? Artículo de revisión. *Rev. Producción + Limpia, 2(2), 57–71.*

Wong, J. W. C., & Fang, M. (2000). EFFECTS OF LIME ADDITION ON SEWAGE SLUDGE COMPOSTING PROCESS. *Pergamon, 34(15), 3691–3698.*

Silvia Helena Zacarias Sylvestre, Estevam Guilherme Lux Hoppe y Roberto Alves de Oliveira. *Eliminación de coliformes totales, coliformes termotolerantes y huevos de helmintos en aguas residuales de producción porcina tratadas en reactores anaeróbicos y aeróbicos.* Revista Internacional de Microbiología Volumen 2014, ID de artículo 757934, 11 páginas <http://dx.doi.org/10.1155/2014/757934>

## CAPÍTULO VI

### APÉNDICES

#### 6.1. Trabajo de campo y laboratorio

**Figura 15**

*PTAR Celendín – reactor anaeróbico de flujo ascendente (RAFA).*



**Figura 16**

*Lecho de secados PTAR Celendín.*



**Figura 17**

*Selección del lodo residual deshidratado en el lecho de secados PTAR Celendín.*



**Figura 18**

*Preparación y aplicación de los tratamientos con óxido de calcio.*



**Figura 19**

*Muestras del lodo residual deshidratado con óxido de calcio.*



**Figura 20**

*Lectura de parámetros: pH y temperatura.*



**Anexo B. Fotografías de laboratorio: equipamiento y análisis**

**Figura 21**

*Equipo autoclave digital para procedimientos de esterilización.*



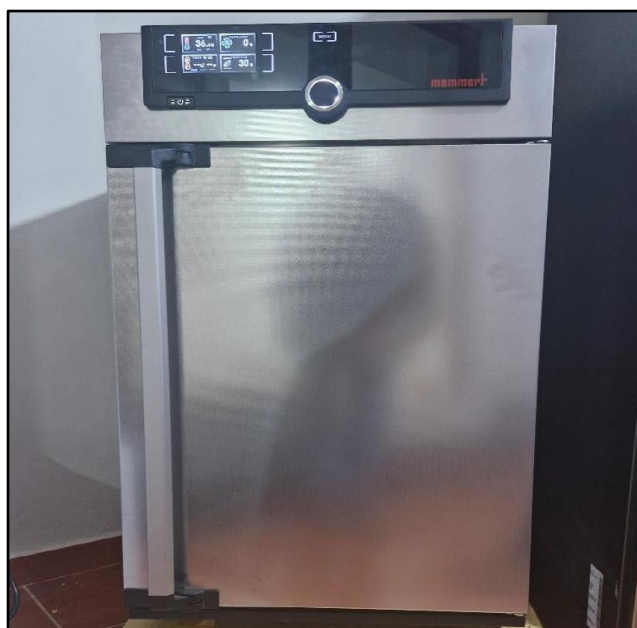
**Figura 22**

*Balanza de precisión para pesado de muestras.*



**Figura 23**

*Incubadora microbiológica 74 Litros.*



**Figura 24**

*Microscopio óptico trilocular.*



**Figura 25**

*Preparación de material estéril para análisis.*



**Figura 26**

*Esterilización de material mediante autoclave.*



**Figura 27**

*Codificación de las muestras.*



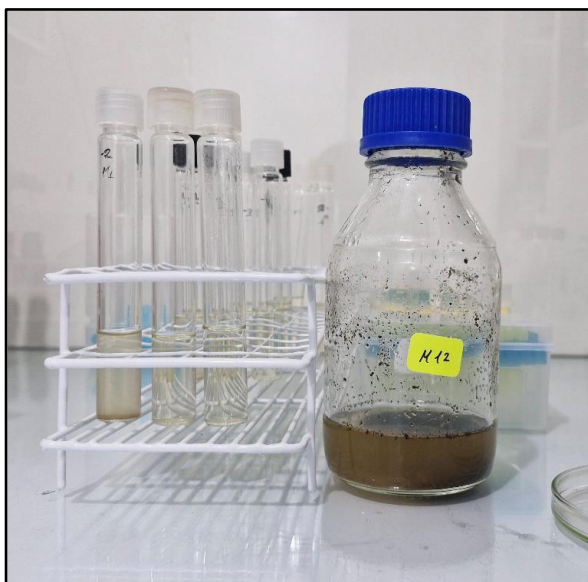
**Figura 28**

*Pesado de muestra para dilución inicial.*



**Figura 29**

*Dilución inicial y sucesivas.*



**Figura 30**

*Siembra en por superficie en placas con Agar McConkey y EMB.*



**Figura 31**

*Incubación de las placas sembradas.*



**Figura 32**

*Pruebas bioquímicas utilizadas en la diferenciación de coliformes (TSI, Citrato de Simmons, MIO, RM-VP).*



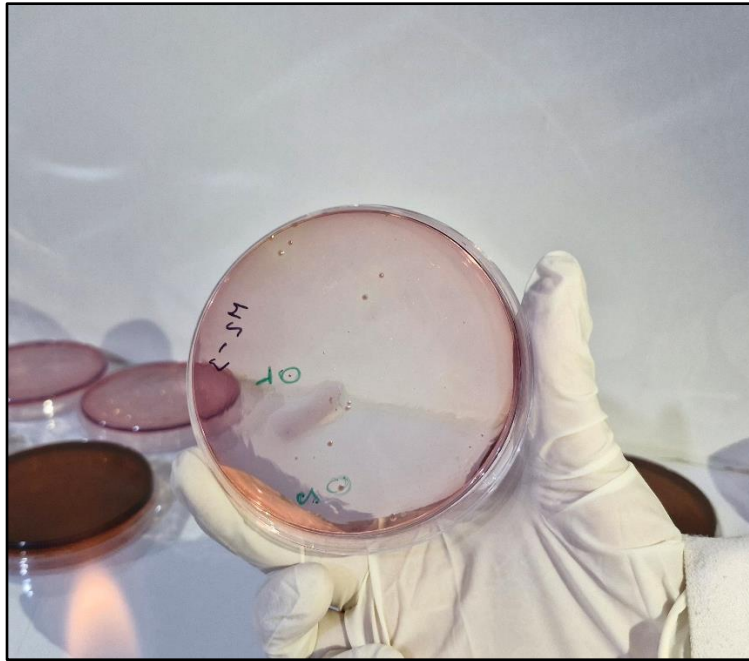
**Figura 33**

*Técnica de sedimentación rápida para concentración y recuento de huevos de helmintos.*



**Figura 34**

*Recuento de colonias posterior al tiempo de incubación.*



**Figura 35**

*Resultado pruebas bioquímicas de colonias aisladas.*



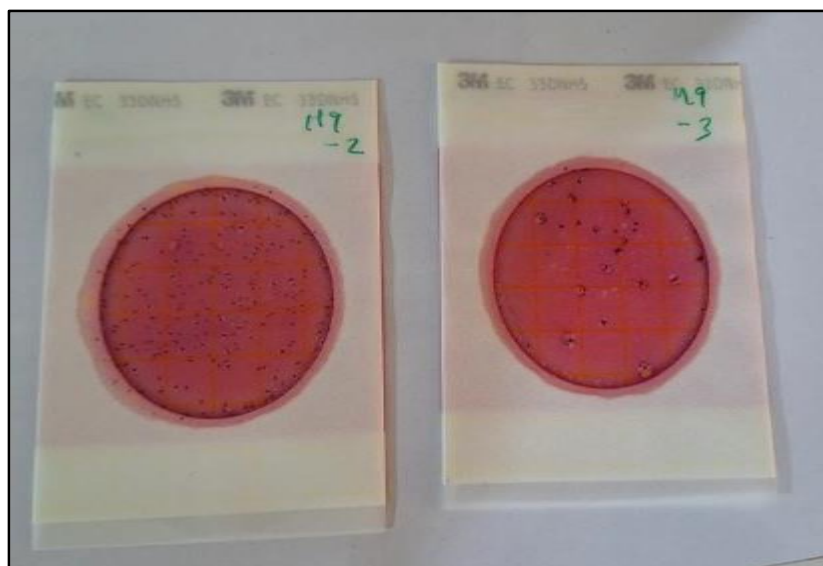
**Figura 36**

*Perfil bioquímico de Escherichia coli.*



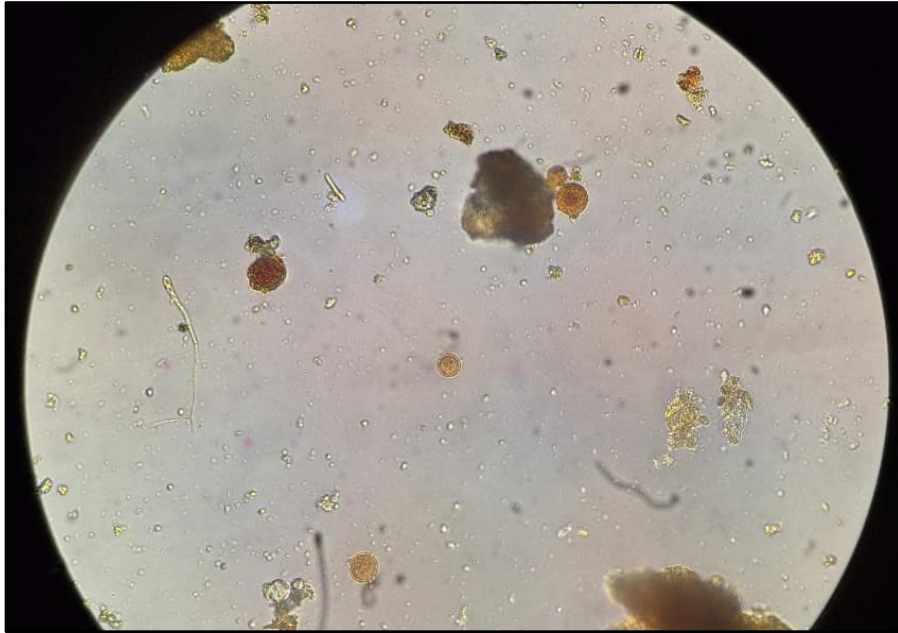
**Figura 37**

*Control de calidad en placas Petri film.*



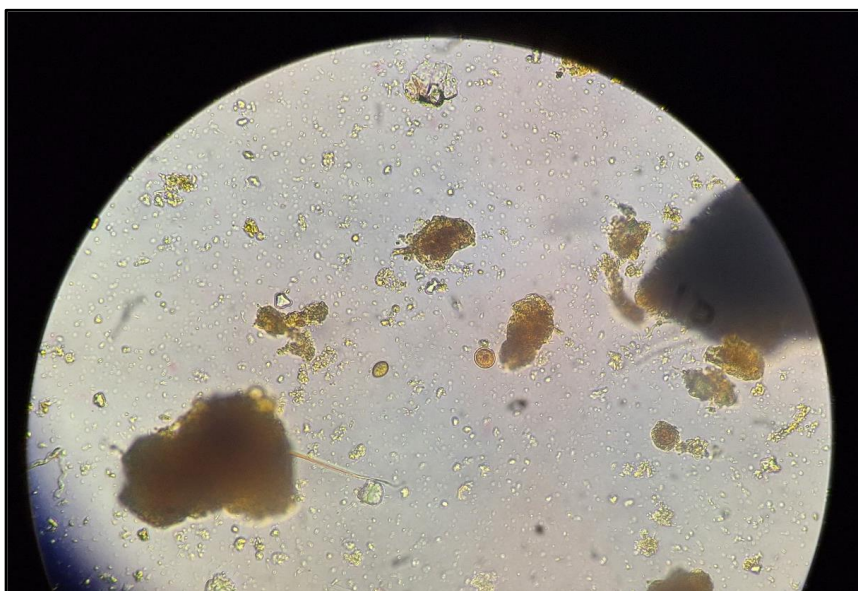
**Figura 38**

*Observación de huevos de helmintos a 10 x con Lugol al 1 % como colorante de contraste.*



**Figura 39**

*Observación de huevos de helmintos a 10 x con Lugol al 1 % como colorante de contraste.*



## CAPÍTULO VII

### ANEXOS

#### 7.1. Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales DECRETO SUPREMO N° 015-2017-VIVIENDA.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>las propuestas de las Unidades Formuladoras del Sector Trabajo y Promoción del Empleo, y sus responsables; así como de las Unidades Ejecutoras de Inversiones del Sector Trabajo y Promoción del Empleo, adjuntando los Formatos N° 02 y N° 03 para sus Registros en el Banco de Inversiones;</p> <p>Que, la Oficina General de Recursos Humanos mediante Informe N° 95-2017-MTPE/4/12.03, establece que la persona propuesta como responsable de la Unidad Formuladora del Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo, cumple con los requisitos para su designación establecidos en el Perfil Profesional del Responsable de la Unidad Formuladora, contenida en el Anexo N° 02 de la citada Directiva N° 001-2017-EF/63.01;</p> <p>Que, la Oficina de Recursos Humanos de la Superintendencia Nacional de Fiscalización Laboral mediante Informe N° 251-2017-SUNAFIL/OGA.ORH, señala que la persona propuesta como responsable de la Unidad Formuladora de la Superintendencia Nacional de Fiscalización Laboral, cumple con los requisitos para su designación conforme el Perfil Profesional del Responsable de la Unidad Formuladora, contenida en el Anexo N° 02 de la referida Directiva N° 001-2017-EF/63.01;</p> | <div><b>VIVIENDA, CONSTRUCCION<br/>Y SANEAMIENTO</b></div> <p><b>Decreto Supremo que aprueba el<br/>Reglamento para el Reaprovechamiento<br/>de los Lodos generados en las Plantas de<br/>Tratamiento de Aguas Residuales</b></p> <p><b>DECRETO SUPREMO<br/>N° 015-2017-VIVIENDA</b></p> <p>EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA</p> <p>CONSIDERANDO:</p> <p>Que, el inciso 22 del artículo 2 de la Constitución Política del Perú señala que las personas tienen derecho a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida;</p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Que, el artículo I del Título Preliminar de la Ley N° 28811, Ley General del Ambiente dispone que toda persona tiene el derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, y el deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus componentes, asegurando particularmente la salud de las personas en forma individual y colectiva, la conservación de la diversidad biológica, el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y el desarrollo sostenible del país;

Que, por su parte, el artículo 6 de la Ley N° 27314, Ley General de Residuos Sólidos establece que la gestión y el manejo de los residuos sólidos de origen industrial, agropecuario, agroindustrial, de actividades de la construcción, de servicios de saneamiento o de instalaciones especiales, son normados, evaluados, fiscalizados y sancionados por los ministerios u organismos reguladores o de fiscalización correspondientes, sin perjuicio de las funciones técnico normativa y de vigilancia que ejercen otras instituciones;

Que, a través del Decreto Legislativo N° 1278, Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos se establece el nuevo marco normativo que define los derechos, obligaciones, atribuciones y responsabilidades de la sociedad en su conjunto, con la finalidad de propender hacia la maximización constante de la eficiencia en el uso de los materiales y asegurar una gestión y manejo de los residuos sólidos económica, sanitaria y ambientalmente adecuada;

Que, de acuerdo a lo señalado por la Quinta Disposición Complementaria Final del Decreto Legislativo precitado, los lodos generados por las plantas de tratamiento de agua para consumo humano, las plantas de tratamiento de aguas residuales y otros sistemas vinculados a la prestación de los servicios de saneamiento, son manejados como residuos sólidos no peligrosos, salvo en los casos que el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento determine lo contrario. Asimismo, precisa que en ningún caso los lodos provenientes de los mencionados sistemas son utilizados sin considerar condiciones sanitarias y ambientales mínimas apropiadas, conforme lo dispone el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento;

Que, por su parte, la Sexta Disposición Complementaria Final del mismo dispositivo normativo establece que el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento regula el reaprovechamiento de lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales de acuerdo con el tipo de actividad a desarrollar. De esta manera, establece que este Ministerio en el término de sesenta (60) días calendario emite, mediante decreto supremo, el reglamento que implemente la referida disposición.

Que, considerando que las tecnologías empleadas en el Perú para el tratamiento de aguas residuales de los servicios de saneamiento permiten la estabilización biológica de los lodos generados en la prestación del servicio y su posterior transformación en biosólidos; resulta necesario establecer disposiciones para regular su reaprovechamiento;

Que, de acuerdo a lo establecido en el artículo 1 del Decreto Ley N° 25809, ninguna entidad, con excepción del Ministerio de Economía y Finanzas, puede irrogarse la facultad de dictar medidas destinadas a restringir o impedir el libre flujo de mercancías mediante la imposición de trámites, requisitos o medidas de cualquier naturaleza que afecten las importaciones o exportaciones;

Que, de acuerdo a lo señalado en el artículo 4 del Decreto Ley N° 25829, las disposiciones por medio de las cuales se establezcan trámites o requisitos o que afecten de alguna manera la libre comercialización interna o la exportación o importación de bienes o servicios podrán aprobarse únicamente mediante Decreto Supremo refrendado por el Ministro de Economía y Finanzas y por el del Sector involucrado;

De conformidad con lo dispuesto en el inciso 8 del artículo 118 de la Constitución Política del Perú; en la Quinta y Sexta Disposición Complementaria Final del Decreto Legislativo N° 1278, Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos; en la Ley N° 29158, Ley Orgánica del Poder Ejecutivo;

la Ley N° 30156, Ley de Organización y Funciones del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, y su Reglamento, aprobado con Decreto Supremo N° 010-2014-VIVIENDA;

DECRETA:

#### Artículo 1.- Aprobación del Reglamento

Apruébese el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.

#### Artículo 2.- Publicación

El presente Decreto Supremo y el Reglamento que se aprueba en el artículo precedente con sus respectivos anexos son publicados en el Portal Institucional del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento ([www.vivienda.gob.pe](http://www.vivienda.gob.pe)) el mismo día de la publicación del presente Decreto Supremo y Reglamento en el diario oficial El Peruano.

#### Artículo 3.- Refrendo

El presente Decreto Supremo es refrendado por el Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento, por la Ministra del Ambiente, por el Ministro de Agricultura y Riego y por el Ministro de Economía y Finanzas.

#### Artículo 4.- Financiamiento

La implementación de lo establecido en el Reglamento aprobado por el artículo 1 del presente Decreto Supremo se financia con cargo al presupuesto institucional de las entidades involucradas, sin demandar recursos adicionales al Tesoro Público.

### DISPOSICIÓN COMPLEMENTARIA FINAL

#### ÚNICA.- Vigencia

El Reglamento aprobado mediante el artículo 1 del presente Decreto Supremo entra en vigencia a partir del día siguiente de la publicación de la Resolución Ministerial que regula el procedimiento aplicable para la implementación del Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos, a cargo del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, la cual se expide en un plazo máximo de treinta (30) días hábiles, contados a partir del día hábil siguiente de publicado el presente Decreto Supremo en el diario oficial El Peruano.

Dado en la Casa de Gobierno, en Lima, a los veintidós días del mes de junio del año dos mil diecisiete.

PEDRO PABLO KUCZYNSKI GODARD  
Presidente de la República

JOSÉ MANUEL HERNÁNDEZ CALDERÓN  
Ministro de Agricultura y Riego

ELSA GALARZA CONTRERAS  
Ministra del Ambiente

ALFREDO THORNE VETTER  
Ministro de Economía y Finanzas

EDMER TRUJILLO MORI  
Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento

### REGLAMENTO PARA EL REAPROVECHAMIENTO DE LOS LODOS GENERADOS EN LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

#### CAPÍTULO I

#### DISPOSICIONES GENERALES

#### Artículo 1.- Objeto

El presente reglamento tiene por objeto establecer las disposiciones para determinar las características de los lodos; así como la clasificación, los parámetros para la producción y el control de la aplicación de los biosólidos provenientes de la estabilización de lodos generados en

las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) domésticas o municipales.

#### Artículo 2.- Finalidad

El presente Reglamento tiene por finalidad promover el reaprovechamiento de los lodos generados en las PTAR, que luego de ser transformados en biosólidos, pueden ser utilizados en actividades agrícolas, forestales, industria cerámica, entre otras, considerando los riesgos a la salud y el ambiente.

#### Artículo 3.- Definiciones

Para los efectos del presente Reglamento, se consideran las siguientes definiciones:

1. **Acondicionador de suelo:** Es toda sustancia cuya acción fundamental consiste en el mejoramiento de las características físicas, químicas y/o biológicas del suelo.

2. **Adquirente:** Pueden ser:

a) Empresas del sector privado que tengan como objeto social la producción, comercialización y/o la disposición final de biosólidos;

b) Empresas operadoras de residuos sólidos que cuenten con la infraestructura y tecnología necesaria para la producción, comercialización y disposición final de biosólidos.

3. **Agentes patógenos:** Son las bacterias, protozoarios, hongos, virus, huevos de helmintos en lodos y/o biosólidos capaces de provocar enfermedades y epidemias en el ser humano.

4. **Aplicación al suelo:** Es el procedimiento por el cual se incorporan, mezclan o se inyectan biosólidos al suelo, de acuerdo con lo establecido en el presente Reglamento, en función a las características físicas, químicas y/o biológicas a mejorarse.

5. **Autoridades sectoriales:** Son el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, el Ministerio del Ambiente y el Ministerio de Agricultura y Riego.

6. **Biosólido:** Es el subproducto resultante de la estabilización de la fracción orgánica de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales, con características físicas, químicas y microbiológicas que permiten su reaprovechamiento como acondicionador del suelo. No son biosólidos las cenizas producto de la incineración de lodos.

7. **Comercializador de biosólidos:** Pueden ser:

a) Prestadores de servicios de saneamiento;

b) Empresas del sector privado que operen PTAR domésticas o municipales;

c) Empresas del sector privado que tengan como objeto social la producción, comercialización y/o disposición final de biosólidos; y,

d) Empresas operadoras de residuos sólidos que, cuenten con la infraestructura y tecnología necesaria para la producción, comercialización y disposición final de biosólidos.

8. **Concentración de contaminante:** Es la característica relacionada necesariamente al peso seco (Sólidos Totales - ST) del lodo residual o biosólido. La concentración de los indicadores para la contaminación fecal está medida en No o NMP (número más probable) por kg ST y las concentraciones de los metales pesados están medidas en mg por kg ST.

9. **Estabilización de lodo:** Es el proceso de reducción de fracción orgánica (Sólidos Volátiles - SV) en relación a la materia seca (Sólidos Totales - ST) para controlar la degradación biológica en el producto, los potenciales de generación de olores, de atracción de vectores y de patogenicidad aplicados a lodos de PTAR.

10. **Ficha de entrega de biosólido:** Es el documento elaborado por el productor del biosólido que se entrega al adquirente y/o usuario final. Contempla información sobre el biosólido tales como: la calidad del producto, los riesgos para su manipulación, de acuerdo con la Clase A y Clase B de biosólidos, entre otros.

11. **Generador de lodos:** Es el prestador de servicios de saneamiento y las empresas del sector privado que operan PTAR domésticas y/o municipales.

12. **Huevo de helminto:** Es el huevo proveniente del grupo de gusanos parásitos que afectan a la salud. Se consideran huevos de helmintos viables a aquellos susceptibles de desarrollarse e infectar.

13. **Higienización:** Es el proceso de reducción de concentraciones de patógenos e indicadores de contaminación de origen fecal de acuerdo con los niveles establecidos en el presente Reglamento.

14. **Humedad:** Es la concentración de agua contenida en los lodos y biosólidos.

15. **Indicadores de contaminación de origen fecal:** El grupo de coliformes termotolerantes indica el nivel de riesgo de presencia de agentes patógenos. Dentro del grupo existen indicadores específicos que se aplican en el presente Reglamento tales como: *Escherichia coli* y *Salmonella* spp.

16. **Lodos:** Son residuos sólidos provenientes de procesos de tratamiento de aguas residuales que cuentan con alta concentración de materia orgánica, característica que se aplica principalmente a los lodos obtenidos en el tratamiento primario y tratamiento secundario así como a las excretas de instalaciones sanitarias in situ.

17. **Productor de biosólidos:**

Pueden ser:

a) Generadores de lodos que realicen el proceso de transformación de dichos residuos en sus PTAR.

b) Empresas del sector privado que tengan como objeto social, la producción, comercialización y/o disposición final de biosólidos.

c) Empresas operadoras de residuos sólidos que cuenten con la infraestructura y tecnología necesaria para la producción, comercialización y disposición final de biosólidos que en su caso adquieran lodos de los prestadores de los servicios de saneamiento para transformarlos en biosólidos, comercializarlos o disponerlos.

18. **Reaprovechamiento:** Es el proceso a través del cual se vuelve a obtener un beneficio del biosólido, permitiendo su reutilización para otros fines.

19. **Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos:** Es el sistema de información oficial y público que tiene por objeto registrar y mantener actualizada información general y relevante sobre los productores y comercializadores de biosólidos para fines de reaprovechamiento.

20. **Residuos sólidos de saneamiento:** Es cualquier objeto, material, sustancia o elemento retirado de las labores de mantenimiento de los sistemas que conforman los servicios de saneamiento: alcantarillado sanitario y del pretratamiento aplicado a una PTAR. Comprende además los lodos obtenidos del tratamiento de aguas residuales y del servicio de disposición sanitaria de excretas.

21. **Sólidos Totales (ST):** Es la materia seca concentrada en los lodos y/o biosólidos que han sido deshidratados hasta alcanzar un peso constante. El valor que se ha evaporado en este proceso corresponde a la humedad.

22. **Sólidos Volátiles (SV):** Son los sólidos orgánicos presentes en los Sólidos Totales (ST) que se volatilizan cuando una muestra secada se quema en condiciones controladas.

23. **Sustratos de complemento:** Son aquellos sustratos del grupo de residuos orgánicos que cuentan con propiedades que aceleran los procesos de la estabilización y/o higienización; y, mejoran las características del biosólido.

24. **Usuario final:** Persona natural o jurídica propietaria o poseedora del área de aplicación de biosólidos.

25. **Tasa agronómica:** Es la tasa de aplicación de biosólido al suelo, considerando la provisión de nutrientes como nitrógeno, fósforo o micronutrientes requeridos para el cultivo o vegetación, evitando generar impactos negativos de contaminación al suelo, a las aguas superficiales y subterráneas.

26. **Tasa de aplicación:** Es la cantidad de biosólido aplicado al suelo, cuantificado en tonelada de materia seca por hectárea.

27. **Tasa máxima anual de contaminantes:** Es la carga máxima de cada contaminante que limita la cantidad de biosólido que se puede aplicar anualmente por hectárea.

28. Vectores: Son los organismos capaces de transportar y transmitir agentes infecciosos, tales como roedores, moscas, mosquitos, entre otros.

#### Artículo 4.- Ámbito de aplicación

4.1 Se sujetan a las disposiciones establecidas en el presente Reglamento y sus normas complementarias los siguientes actores:

1. Los generadores de lodos provenientes de las PTAR.
2. Los productores, los comercializadores, las empresas de transporte, los adquirentes y los usuarios finales de biosólidos.

4.2 El presente Reglamento no resulta aplicable a:

1. Los generadores de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua para consumo humano (PTAP) y otros sistemas vinculados a la prestación de servicios de saneamiento.
2. Los generadores de lodos provenientes de PTAR no domésticas, de desechos agroindustriales y lodos generados en plantas que sirven únicamente para el tratamiento de efluentes de establecimientos de salud y otros, los cuales, no podrán disponer de dichos lodos con fines de reaprovechamiento. A efectos del reaprovechamiento de los lodos residuales, dichos generadores se sujetan a las normas especiales y sectoriales sobre la materia.

**Artículo 5.- Competencias y funciones de las autoridades vinculadas al reaprovechamiento de biosólidos**

Las siguientes autoridades, en el marco de sus competencias y funciones, están vinculadas al reaprovechamiento de biosólidos:

5.1. El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento es el Ente Rector del Sector Saneamiento, encargado de regular el reaprovechamiento de residuos sólidos generados en las actividades de los servicios de saneamiento, de conformidad con la normativa vigente.

5.2. El Ministerio del Ambiente es el Ente Rector del Sector Ambiental, encargado de coordinar, promover y concertar con las autoridades sectoriales la debida aplicación de las normas que regulan la gestión integral de los residuos sólidos, de conformidad con la normativa vigente.

5.3. El Ministerio de Agricultura y Riego – MINAGRI, a través de la Dirección General de Asuntos Ambientales Agrarios - DGAAA, implementa acciones en el marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental para la conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales renovables de su competencia así como promover la gestión eficiente del recurso suelo para uso agrario, de conformidad con la normativa vigente.

### CAPÍTULO II

#### REAPROVECHAMIENTO DE LOS BIOSÓLIDOS PROVENIENTES DE LA ESTABILIZACIÓN DE LODOS GENERADOS EN LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

##### SUBCAPÍTULO I

#### Reaprovechamiento de biosólidos

**Artículo 6.- Facultad de los prestadores de servicios de saneamiento para comercializar biosólidos con fines de reúso**

6.1 Los prestadores de servicios de saneamiento se encuentran facultados a comercializar biosólidos provenientes de la estabilización de lodos generados en las PTAR con fines de reúso a favor de terceros, con la correspondiente contraprestación, siempre que exista acuerdo previo entre los actores, de conformidad con lo establecido por el Decreto Legislativo N° 1280, Decreto Legislativo que aprueba la Ley Marco de la Gestión y Prestación de los Servicios de Saneamiento.

6.2 El destino de los ingresos obtenidos por los prestadores de servicios de saneamiento, como consecuencia de la comercialización de biosólidos se sujeta a las disposiciones establecidas por la normativa vigente.

**Artículo 7.- Otros productores vinculados a la comercialización**

El productor de biosólidos de Clase A y de Clase B distintos al indicado en el artículo precedente, puede comercializar biosólidos con el adquirente o usuario final, según corresponda, previo cumplimiento de las disposiciones establecidas en el presente Reglamento.

**Artículo 8.- Comercialización de lodos sin condiciones de estabilización**

La comercialización de lodos generados en las PTAR a los productores de biosólidos que no cumpla el parámetro de estabilización indicado en el artículo 12, obliga al generador, por lo menos, al cumplimiento de los parámetros establecidos en la Tabla N° 2 del artículo 13.

### SUBCAPÍTULO II

#### Características de los lodos

**Artículo 9.- Características de lodos para su transformación en biosólidos**

9.1. Los lodos generados en las PTAR para poder ser transformados en biosólidos deben contar con alta concentración de materia orgánica (SV).

9.2. La transformación de dichos lodos y excretas en biosólidos exige la ausencia de impurezas visibles y no degradables tales como plástico, vidrio y/o metal.

**Artículo 10.- Posibilidad de mezclar los lodos con otros componentes para la producción de biosólidos**

10.1. A efectos de los procesos de estabilización y/o de higienización, el productor de biosólidos está habilitado a mezclar los lodos con sustratos de complemento siempre y cuando se garantice que la calidad final del biosólido que se produzca cumpla con los parámetros establecidos en el presente Reglamento.

10.2. Se encuentra prohibido mezclar o incorporar a los lodos generados en las PTAR para la producción de biosólidos, los siguientes sustratos:

1. Residuos sólidos del servicio de alcantarillado sanitario y de pretratamiento de PTAR tales como residuos de rejas, arenas y lodos de alcantarillado y de desarenador.

2. Material flotante que contiene residuos no degradables (plástico) de decantadores primarios, caja de distribución, digestores de lodo y de otros tipos de reactores.

3. Lodos terciarios generados en el postratamiento de aguas residuales domésticas y/o municipales y lodos generados en las PTAP en función de aditivos químicos por procesos de precipitación, floculación, sedimentación y filtración.

### SUBCAPÍTULO III

#### Clasificación y parámetros para la producción de biosólidos

#### Artículo 11.- Clasificación de biosólidos

11.1. El productor puede producir biosólidos que, de acuerdo a sus características, se clasifican en:

1. Biosólido de Clase A: Son aquellos aplicables al suelo sin restricciones sanitarias.

2. Biosólido de Clase B: Son aquellos aplicables al suelo con restricciones sanitarias según localización de los suelos y/o tipo de cultivo.

11.2. Para el reaprovechamiento de los biosólidos de Clase A y/o de Clase B, los productores deben cumplir de forma conjunta con los parámetros de estabilización, toxicidad química e higienización, de acuerdo a las

condiciones establecidas en el presente Reglamento para cada tipo de biosólido.

11.3. En caso que los lodos generados en las PTAR no cumplan con los parámetros de estabilización e higienización al momento de su extracción de la PTAR, dichos parámetros deben ser alcanzados como parte del proceso de producción de biosólidos conforme a las tecnologías de estabilización e higienización previstas en los Anexos I y II, respectivamente.

#### Artículo 12.- Parámetro de estabilización

12.1. Los lodos generados en las PTAR para ser estabilizados y calificados como biosólidos de Clase A y de Clase B deben cumplir con el siguiente parámetro:

| Tabla N° 1<br>Estabilización de lodos                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Concentración de materia orgánica:<br>Materia orgánica (SV) ≤ 60% de Materia seca (ST) |

12.2. Para llevar a cabo el proceso de estabilización del lodo deben aplicarse las tecnologías previstas en el Anexo I.

12.3. En caso de no aplicar las tecnologías indicadas en el Anexo I o no obtener el valor de estabilización indicado en la Tabla N° 1, el lodo resultante del proceso empleado no puede ser calificado como biosólido de Clase A ni de Clase B. Dicho lodo debe ser reaprovechado o dispuesto conforme a lo establecido por la norma sectorial que regula las condiciones mínimas de manejo de lodos y las instalaciones para su disposición final.

#### Artículo 13.- Parámetro de toxicidad química

13.1. Los biosólidos de Clase A y de Clase B deben cumplir con los siguientes parámetros de toxicidad química:

| Tabla N° 2                                                            |          |        |       |       |       |          |        |      |
|-----------------------------------------------------------------------|----------|--------|-------|-------|-------|----------|--------|------|
| Parámetros de toxicidad química en biosólidos de Clase A y de Clase B |          |        |       |       |       |          |        |      |
| Mg/kg ST<br>Materia Seca                                              | Arsénico | Cadmio | Cromo | Cobre | Plomo | Mercurio | Níquel | Zinc |
| Clase A y<br>Clase B                                                  | 40       | 40     | 1200  | 1500  | 400   | 17       | 400    | 2400 |

13.2. En caso la concentración exceda uno de los valores indicados en la Tabla N° 2, el lodo no puede ser calificado como biosólido de Clase A ni de Clase B.

#### Artículo 14.- Parámetros de higienización

14.1. Los biosólidos de Clase A y de Clase B deben cumplir con los parámetros de higienización siguientes:

| Tabla N° 3<br>Parámetros de higienización de biosólidos |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Indicador                                               | Clase A                                                                                                               | Clase B                                                                                                                                                                                                                       |
| Indicadores de contaminación fecal                      | <i>Escherichia coli</i> < 1000 NMP/ 1g ST<br>o<br><i>Salmonella</i> sp. < 1 NMP / 10g ST                              | El nivel de higienización se puede demostrar con el cumplimiento de los procesos previstos en el Anexo I, en su defecto, mediante alguna de las tecnologías indicadas para la higienización, en la Sección B del Anexo N° II. |
| Indicador de Huevos de Helminthos                       | Huevos viables de Helminthos < 1 / 4g ST<br>o<br>Prueba de utilización de tecnologías indicadas para la higienización |                                                                                                                                                                                                                               |

14.2. El productor de biosólidos de Clase A está obligado a cumplir como mínimo con uno de los Indicadores de Contaminación Fecal (*Escherichia coli* o *Salmonella*

sp) de acuerdo con la Tabla N° 3 y con las condiciones determinadas en la Sección A del Anexo II. La inviabilidad de huevos de helminthos puede ser probada, alternativamente a lo establecido en la Tabla N° 3, con la utilización de alguna de las tecnologías para la higienización de biosólidos establecidas en la Sección A del Anexo II.

14.3. El productor de biosólidos de Clase B está obligado a realizar la higienización de acuerdo con los procesos previstos en el Anexo I. En defecto de ello, mediante alguna de las tecnologías indicadas en la Sección B del Anexo II.

14.4. El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y el Ministerio de Agricultura y Riego, de considerarlo necesario, pueden solicitar el monitoreo de otros parámetros de higienización. Como alternativa para el Indicador de Contaminación Fecal *Escherichia coli* se puede autorizar la utilización del parámetro de Bacterias Termotolerantes < 1000 NMP/ 1g ST, en caso de ser necesario.

14.5. En caso de no cumplir con una de las exigencias indicadas en la Tabla N° 3, el biosólido de Clase A o de Clase B, según corresponda, no puede ser reaprovechado para las actividades establecidas por el presente Reglamento.

#### Artículo 15.- Control de la concentración de nitrógeno total y otros nutrientes

15.1. A efectos de la comercialización de biosólidos, el productor debe informar a la Dirección General de Asuntos Ambientales – DGAA del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, en cada oportunidad que realice dicha actividad, la concentración del parámetro nitrógeno total en los biosólidos. De no cumplirse con ello, el subproducto no puede ser reaprovechado como biosólido de Clase A ni de Clase B.

15.2. El Ministerio de Agricultura y Riego y/o el usuario final, según corresponda, puede exigir el monitoreo de las concentraciones de otros nutrientes presentes en los biosólidos de Clase A y de Clase B en función del suelo y cultivo sobre el cual sea reaprovechado. Dicho requerimiento se relaciona únicamente con el destino del biosólido y no influye en su clasificación.

#### Artículo 16.- Monitoreo inicial de los parámetros

16.1. A efectos de la inscripción en el Registro Nacional para la Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos, los productores de biosólidos de Clase A realizan un monitoreo inicial que compruebe el cumplimiento de los parámetros exigidos en los artículos 12, 13, 14 y 15, de manera previa al inicio de la comercialización.

16.2. Para productores de biosólidos de Clase B no es obligatorio realizar un monitoreo inicial previo a la comercialización. Excepcionalmente, la DGAA puede solicitar dicho monitoreo a los productores que generen grandes cantidades de biosólidos o productores que obtengan lodos generados en las PTAR con gran influencia de actividad industrial.

#### Artículo 17.- Frecuencia del monitoreo de los parámetros

17.1. Los productores de biosólidos que operen lagunas de estabilización, lagunas anaerobias, facultativas, aireadas y lagunas con macrofitas deben realizar el monitoreo de los parámetros exigidos en los artículos 12, 13, 14 y 15 al momento de la extracción de la PTAR.

17.2. La frecuencia de monitoreo de la calidad de los biosólidos de Clase A y de Clase B obtenidos de los procesos de tratamiento indicados en los incisos 2, 3 y 4 del Anexo I se realiza de acuerdo con los valores definidos a continuación:

| Tabla N° 4                                                          |                        |           |              |           |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------|--------------|-----------|
| Frecuencia de monitoreo para los biosólidos de Clase A y de Clase B |                        |           |              |           |
| ton ST/ año                                                         | < 500                  | 500≤1 500 | 1 500≤15 000 | >15 000   |
| Clase A                                                             | Anual                  | Semestral | Trimestral   | Bimestral |
| Clase B                                                             | A solicitud de la DGAA |           |              |           |

17.3. La frecuencia del monitoreo indicado en la Tabla N° 4 debe realizarse por cada PTAR que produzca biosólidos. Se prohíbe la mezcla de biosólidos de Clase A y de Clase B para efectos del monitoreo.

17.4. Para los biosólidos de Clase A, es condición obligatoria, para iniciar la comercialización, registrar ante la DGAA los resultados de un primer monitoreo, que compruebe la calidad del biosólido conforme al párrafo 16.1 del artículo 16 precedente.

17.5. En caso que, como resultado de los monitoreos continuos, uno de los parámetros de toxicidad química, establecidos en el artículo 13, supere el 80 % de su valor máximo, la frecuencia de monitoreo debe realizarse de la siguiente manera:

1. Para el biosólido de Clase A: Como regla general, se aplica una frecuencia de monitoreo bimestral. En caso que la PTAR produzca biosólidos en una cantidad mayor a 15,000 toneladas por año es necesaria una frecuencia de monitoreo mensual.

2. Para el biosólido de Clase B: Se exige una frecuencia de monitoreo trimestral a cualquier PTAR, independientemente de la cantidad de biosólido que produzca.

Los productores de biosólidos que acrediten ante la DGAA la regularización de los parámetros de toxicidad química a porcentajes menores al 80 % de su valor máximo, deben aplicar la frecuencia de monitoreo establecida en la Tabla N° 4.

17.6. En caso de existir cambios en las condiciones de operación en la PTAR que impacten en la generación de lodos y producción de biosólidos, el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento establece la aplicación de monitoreos con mayor frecuencia mediante la aprobación de normas complementarias.

17.7. El resultado del monitoreo de los parámetros debe consignarse en el Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos. La DGAA es el órgano responsable de efectuar la oportuna anotación del resultado del monitoreo y está facultada a tomar la información como insumo para las actividades de supervisión, sin perjuicio de las competencias del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA.

17.8. En caso se implementen y operen nuevas tecnologías de tratamiento de aguas residuales domésticas y/o municipales con estabilización de lodos de acuerdo al inciso 5 del Anexo I, la frecuencia de monitoreo se realiza de acuerdo a la frecuencia de producción obtenida durante el primer año de operación. Posteriormente, la frecuencia se determina en función al tipo de lodo que se genere.

#### Artículo 18.- Aplicación del biosólido de Clase A

18.1. El biosólido de Clase A destinado para su reaprovechamiento como acondicionador de suelos en agricultura y/o mejoramiento de suelos. De manera enunciativa y no limitativa, puede ser reaprovechado en las siguientes actividades:

1. Producción de almácigo y utilización en viveros.
2. Acondicionamiento de suelos para agricultura, pastos y forrajes, excepto la aplicación directa a los cultivos de vegetales y frutas rastreras de consumo crudo.
3. Mejoramiento de suelos y áreas verdes urbanas con acceso restringido a la población en un periodo no menor a siete (7) días.
4. Aplicación en las áreas destinadas para el biosólido de Clase B.
5. Comercialización a empresas productoras de insumos de usos agrícolas, que se encarguen de producir compost, humus u otros productos con fines de acondicionamiento del suelo.
6. Comercialización a empresas del sector privado que tengan como objeto social la producción, comercialización y/o disposición final de biosólidos.
7. Comercialización a empresas operadoras de residuos sólidos.

18.2. El Ministerio de Agricultura y Riego, de acuerdo a sus competencias, puede establecer otras áreas de

aplicación para el reaprovechamiento del biosólido de Clase A como acondicionador de suelos en agricultura y/o mejoramiento de suelos, teniendo en consideración sus características así como las prohibiciones establecidas en el artículo 20. Dicha entidad debe obtener previamente la opinión favorable del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

#### Artículo 19.- Aplicación del biosólido de Clase B

19.1. El biosólido de Clase B está destinado para su reaprovechamiento en suelos que excluyen el riesgo de contacto con la población y actividades ganaderas. Este biosólido puede ser reaprovechado únicamente en las siguientes actividades:

1. Fines agrícolas y/o forestales para plantas de tallo alto y que son procesados para su comercialización (cultivo de café y cultivos para la producción de fibra y madera).
2. Recuperación de áreas degradadas ubicadas a por lo menos 100 metros de distancia de pueblos y viviendas.
3. Reforestación de suelos con acceso restringido a la población y/o animales por un periodo mínimo de treinta (30) días calendario a partir de la aplicación del biosólido.
4. Material de cobertura final para rellenos sanitarios, rellenos de seguridad o canchas de relaves con fines de reforestación o siembra de otros cultivos.
5. Comercialización a empresas que se encarguen de transformar biosólidos de Clase B en Clase A para su venta como compost, humus u otros acondicionadores de suelos.
6. Comercialización a empresas operadoras de residuos sólidos.

19.2. Las autoridades sectoriales, en el marco de sus competencias, pueden determinar otro tipo de aplicación de los biosólidos de Clase B teniendo en consideración los parámetros establecidos en los artículos 12, 13, 14 y 15 y las prohibiciones determinadas en el artículo 20. Dichas entidades deben obtener previamente la opinión favorable del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

#### Artículo 20.- Prohibiciones para la aplicación de biosólidos de Clase A y de Clase B

20.1. Independientemente de su clasificación, está prohibida la aplicación de biosólidos en los siguientes supuestos:

1. Cuando los biosólidos no cumplen con alguno de los parámetros establecidos en los artículos 12, 13, 14 y 15.
2. La aplicación de biosólidos para el llenado de excavaciones de minas, áridos y canteras que no tienen como objetivo principal su reaprovechamiento como acondicionador de suelo.
3. La aplicación de biosólidos en áreas ubicadas dentro de los 300 metros de distancia de una captación de agua subterránea para agua potable.
4. La aplicación de biosólidos en áreas ubicadas dentro de los 500 metros de distancia al punto "aguas arriba" de captación de las aguas superficiales para agua potable.
5. La aplicación a los tipos de suelos que se señalan a continuación:
  - a) Suelo con contenido de arena igual o superior a un setenta por ciento (70 %) que se encuentre en zonas de precipitaciones media anual superiores a 100 mm.
  - b) Suelos ácidos con un valor inferior a pH 5.
  - c) Suelos con pendiente superior a quince por ciento (15 %) y sin presencia de cobertura vegetal o riesgo de huayco.
  - d) Suelos con riesgo de inundación, napa freática a menos de 1 metro de profundidad y/o suelos saturados con agua, la mayor parte del año.
  - e) Suelos ubicados a menos de 15 metros de las riberas de ríos y lagos.
  - f) Suelos en áreas naturales protegidas, de uso directo o indirecto, así como zonas reservadas, salvo disposición expresa de las autoridades competentes.

20.2. Las limitaciones a la aplicación de biosólidos de Clase A y de Clase B o la variación de la distancia fijada en el presente artículo que sean determinadas por las autoridades sectoriales, deben realizarse en coordinación con el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

#### SUBCAPÍTULO IV

Parámetros de control e impacto en la aplicación de biosólidos al suelo

**Artículo 21.- Control de la Tasa Máxima Anual de contaminantes**

21.1. La Tasa Máxima Anual de Contaminantes (kg contaminante por hectárea y año) se calcula de acuerdo a la concentración de contaminante (kg contaminante/ton ST Biosólidos) por la tasa de aplicación metales pesados por año (ton ST Biosólidos/ Ha suelo) la cual se limita de acuerdo a los siguientes valores máximos:

| Tabla N° 6<br>Tasa Máxima Anual de contaminantes para aplicación de biosólidos |          |        |       |       |       |          |        |      |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------|--------|-------|-------|-------|----------|--------|------|
| Kg contaminante/Ha suelo (año)                                                 | Arsénico | Cadmio | Cromo | Cobre | Plomo | Mercurio | Níquel | Zinc |
| Clase A y Clase B                                                              | 2,0      | 2,0    | 75    | 100   | 20    | 1,0      | 20     | 150  |

21.2. En caso el resultado exceda uno de los valores indicados en la Tabla N° 5, el biosólido no puede ser aplicado nuevamente en la misma área de suelo. El usuario final debe esperar como mínimo doce (12) meses para volver a aplicarlo, siempre que se reduzca la tasa anual a los parámetros establecidos en la Tabla N° 5.

21.3. El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y el Ministerio de Agricultura y Riego supervisan y fiscalizan, en el marco de sus competencias, el cumplimiento del párrafo precedente. Dichas entidades, de considerarlo necesario y según sea el caso, pueden solicitar el monitoreo de otros metales pesados u otros compuestos, siempre que como parte de las acciones de supervisión se acredite su presencia en valores que puedan colocar en riesgo la salud de las personas.

**Artículo 22.- Control de la Tasa Agronómica**

22.1. La Tasa Agronómica de aplicación máxima de fertilizante se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula:

| Tabla N° 6<br>Parámetro Tasa Agronómica |                                                                                                                             |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Indicador                               | Tasa de Nitrógeno Total (N) en los biosólidos                                                                               |
| Clase A y B                             | Tasa de aplicación (ton ST <sub>Biosólido</sub> /ha) = $N_{\text{DEMANDA}} / N_{\text{OFERTA}}$ (kg N/ha <sub>suelo</sub> ) |
| Donde:                                  |                                                                                                                             |
|                                         | $N_{\text{DEMANDA}}$ : Demanda Nitrógeno Total por hectárea de suelo y cultivo                                              |
|                                         | $N_{\text{OFERTA}}$ : Oferta de Nitrógeno Total por tonelada de biosólido                                                   |

22.2 La aplicación de la Tasa Agronómica exige considerar que no se exceda la tasa máxima de nutrientes, especialmente la de nitrógeno, de acuerdo a los criterios indicados en el Anexo III.

#### CAPÍTULO III

#### RESPONSABILIDADES Y OBLIGACIONES DE LA PRODUCCIÓN Y DEL REAPROVECHAMIENTO DE BIOSÓLIDOS

**Artículo 23.- Obligaciones del generador de lodos**  
Son obligaciones del generador de lodos, las siguientes:

1. Certificar el cumplimiento de los parámetros establecidos en el artículo 12.
2. Entregar dicha certificación al productor de biosólidos.

**Artículo 24.- Responsabilidad del productor**

El productor, con independencia de la clasificación del biosólido, es responsable de la calidad y control de los parámetros establecidos en el presente Reglamento, hasta su entrega directa al adquirente, usuario final o empresa de transporte contratada, según corresponda.

**Artículo 25.- Obligaciones del productor en relación a la calidad de biosólido**

El productor, con independencia de la clasificación del biosólido, está obligado a:

1. Cumplir con los parámetros establecidos en los artículos 12, 13, 14 y 15.
2. Inscribirse en el Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos.
3. Realizar el monitoreo inicial de acuerdo al párrafo 16.1 del artículo 16 y entregar sus resultados a la DGAA dentro del procedimiento de inscripción al Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos.
4. Entregar al adquirente o usuario final, según corresponda, la Ficha de Entrega de Biosólido.
5. Informar a la DGAA sobre los cambios en la producción de biosólidos que puedan exigir monitoreos adicionales conforme a lo establecido en el párrafo 14.4 de artículo 14.
6. Actualizar trimestralmente su registro en la DGAA, de acuerdo con la información contenida en el párrafo 31.2 del artículo 31.

**Artículo 26.- Responsabilidad del productor con relación a la comercialización**

26.1 Los productores de los biosólidos de Clase A y de Clase B pueden comercializar dichos subproductos con el adquirente o usuario final, según corresponda, de acuerdo con los parámetros establecidos en el presente Reglamento. En cualquier caso, dichos productores se encuentran sujetos a las responsabilidades y obligaciones establecidas en el presente Reglamento.

26.2 Los productores de biosólidos que adquieran los subproductos provenientes de procesos de tratamiento de aguas residuales domésticas y/o municipales para transformarlos en biosólidos y otros acondicionadores del suelo, tal como compost o humus, deben estar acreditados ante la DGAA y se encuentran obligados a cumplir con todas las exigencias establecidas en el presente Reglamento.

**Artículo 27.- Responsabilidad del comercializador de biosólidos**

27.1 El comercializador de biosólidos está prohibido de incorporar, mezclar y/o combinar los biosólidos adquiridos, cualquiera que fuera su clase, con cualquier insumo y/o compuesto que no cumpla con los parámetros regulados en el presente Reglamento y; en consecuencia, afecte la calidad de los biosólidos.

27.2 Entregar copia de la Ficha de Entrega de Biosólidos al usuario final.

27.3 Asimismo, es responsable del cumplimiento de las obligaciones previstas en el presente Reglamento, en lo que corresponda.

**Artículo 28.- Responsabilidad de las empresas que transportan biosólidos**

28.1. El traslado de los biosólidos fuera de las instalaciones de los productores de biosólidos puede estar a cargo de cualquier empresa transportadora que garantice la indemnidad del biosólido así como su impacto en el ambiente durante la prestación del servicio de transporte. Para tal efecto, se debe considerar lo establecido en el párrafo 33.1 del artículo 33.

28.2. El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento emite los procedimientos o protocolos que deben seguir las empresas de transporte para asegurar el adecuado traslado de los biosólidos fuera de las instalaciones del productor.

**Artículo 29.- Responsabilidad del Usuario Final de biosólidos**

29.1. El usuario final debe informar al productor sobre el tamaño y tipo de área y/o cultivo al cual se aplica el

biosólido, sin importar su clasificación. La información sirve al productor para la actualización del registro de producción de biosólidos.

29.2. El usuario final es responsable de la calidad y control de los biosólidos desde el momento de su adquisición teniendo en consideración los tipos de reaprovechamiento establecido para cada clase de biosólido y haciéndose responsable por el uso adecuado de dicho subproducto.

29.3. Dentro del ámbito de su responsabilidad, el usuario final debe cumplir con las exigencias establecidas para los metales pesados de acuerdo con los valores máximos anuales establecidos en el artículo 21. Asimismo, debe cumplir con las exigencias vinculadas a la Tasa Agronómica de acuerdo al parámetro previsto en el artículo 22.

#### CAPÍTULO IV

##### REGISTRO NACIONAL DE PRODUCCIÓN Y REAPROVECHAMIENTO DE BIOSÓLIDOS

**Artículo 30.- Inscripción, actualización y cancelación del Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos**

30.1 Los agentes involucrados con la producción y comercialización de biosólidos se encuentran obligados a inscribirse en el Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos, de manera previa a la comercialización. El procedimiento administrativo aplicable a la inscripción del productor está sujeto a silencio administrativo negativo.

30.2 La inscripción de los productores de biosólidos en el Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos es un procedimiento administrativo de evaluación previa. El productor debe solicitar la inscripción en el Registro adjuntando el formato del Anexo IV, detallando la siguiente información:

1. La tecnología de la PTAR generadora de lodos.
2. La cantidad de biosólidos que se estima producir, según clase.
3. La tecnología utilizada para la producción de biosólidos de acuerdo a los Anexos I y II.
4. La concentración de nutrientes en el biosólido de Clase B, de acuerdo al Anexo III.
5. Los resultados del monitoreo inicial, en los casos de producción de biosólido de Clase A.

Adicionalmente, el productor de biosólidos debe incluir el pago por el derecho de tramitación.

30.3 El plazo máximo para resolver el procedimiento de inscripción de los productores de biosólidos en el Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos es de treinta (30) días hábiles.

30.4 La inscripción de los comercializadores de biosólidos en el Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos es un procedimiento de aprobación automática. El comercializador de biosólidos debe solicitar la inscripción en el Registro detallando la siguiente información:

1. La razón social, número de registro único de contribuyente, domicilio fiscal, número de partida electrónica donde conste inscrita la empresa con indicación de la oficina registral.
2. Los nombres y apellidos del representante legal, número de documento nacional de identidad (carné de extranjería o pasaporte).
3. La copia simple de la licencia de funcionamiento del establecimiento en donde ejerce la actividad, en caso no sea productor de biosólido.
4. El pago por el derecho de tramitación.

30.5 El plazo máximo para otorgar al comercializador de biosólidos la Constancia de Inscripción en el Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos es de cinco (05) días hábiles.

30.6 La información a que se refieren los párrafos 30.2 y 30.4 se presenta mediante carta simple o de ser el caso a través del mecanismo informático que implemente el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento.

30.7 Los productores de biosólidos inscritos en el Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos que decidan cambiar la clase de biosólidos que producen y/o las tecnologías declaradas, deben actualizar su inscripción ante la DGAA en un plazo no mayor de treinta (30) días hábiles, previo al inicio de la comercialización. Para tal efecto, deben adjuntar la información actualizada indicada en los párrafos 30.2. El plazo máximo del procedimiento de actualización de la inscripción en el Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos es de quince (15) días hábiles.

30.8 El productor de biosólidos mantiene la vigencia de su inscripción en el Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos siempre que cumpla con remitir trimestralmente a la DGAA las Fichas de Entrega de Biosólido y con presentar los resultados de aquellos monitoreos establecidos en los párrafos 17.4 y 17.5 del artículo 17.

30.9 El comercializador de biosólidos mantiene la vigencia de su inscripción en el Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos siempre que cumpla con remitir trimestralmente a la DGAA la Ficha de Entrega de Biosólido y con entregar copia de dicho documento al usuario final.

30.10 En caso el productor o comercializador de biosólidos solicite la cancelación de la inscripción en el Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos, la DGAA en un plazo de cinco (05) días hábiles emite la resolución de cancelación de la inscripción y procede con la actualización del Registro.

##### Artículo 31.- Suspensión del registro

31.1 El productor puede ser suspendido del Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos, en el caso que:

1. Incumpla con los parámetros de toxicidad química establecidos en la Tabla N° 2. Para el levantamiento de dicha suspensión, debe acreditarse ante la autoridad competente que se ha cumplido con identificar, controlar y eliminar el exceso de concentración del (los) metal(es) pesado(s) que corresponda(n).
2. Incumpla con remitir, en dos (2) oportunidades consecutivas, las Fichas de Entrega de Biosólido, los resultados de los monitoreos, o los cambios en la información declarada en la inscripción en el Registro, conforme a lo dispuesto en el párrafo 30.5 del artículo 30. Para el levantamiento de dicha suspensión, debe acreditarse ante la autoridad competente que se ha cumplido con remitir la documentación y/o información que corresponda.

31.2 El comercializador puede ser suspendido del Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos, en caso de incumplir en tres (3) oportunidades la obligación de entregar copia de la Ficha de Entrega de Biosólido al usuario final, conforme a lo dispuesto en el párrafo 30.6 del artículo 30.

31.3 El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento aprueba el procedimiento de suspensión del Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos que corresponda.

##### Artículo 32.- Ficha de Entrega de Biosólido

32.1 Los productores de biosólidos de Clase A y de Clase B están obligados a entregar al transportador, comercializador y/o usuario final, según sea el caso, una copia de la Ficha de Entrega del Biosólido. Cuando la entrega del biosólido se realice al transportador o comercializador, estos a su vez están obligados a entregar la copia de la Ficha de Entrega al usuario final. En cualquier caso, la Ficha de Entrega de Biosólido se genera en cada operación.

32.2 La Ficha de Entrega de Biosólido debe contener como mínimo la siguiente información:

1. Código del productor.

2. Información sobre el comercializador y/o usuario final (nombres y apellidos, documento nacional de identidad, razón social, registro único de contribuyente, entre otras).

3. Clasificación del biosólido.

4. Volumen en materia seca (tonelada de ST) entregado.

5. Fecha de entrega.

6. Resultado del último monitoreo para el biosólido de Clase A; respecto al de Clase B la información disponible.

7. Anotación de las alternativas de aplicación según su clase y conforme lo indique el presente Reglamento.

8. Anotación de las medidas de seguridad para la manipulación de biosólidos, según su clasificación.

9. Información sobre el destino de reaprovechamiento declarado por el comercializador o usuario final.

Los Anexos V y VI corresponden a los formatos de Ficha de Entrega de Biosólido de Clase A y de Clase B, respectivamente.

32.3 El productor de biosólido está obligado a registrar y archivar por cinco (5) años cada una de las Fichas de Entrega de Biosólido según su clasificación, para efectos del cumplimiento del artículo precedente. Dicha actividad puede realizarse de forma física o digital.

#### **Artículo 33.- Obligación de implementar medidas de seguridad en el transporte**

El traslado de los biosólidos dentro o fuera de las instalaciones del productor debe realizarse en vehículos acondicionados para dicho fin, con la finalidad de evitar su dispersión en el ambiente durante su traslado, de conformidad con las normas sectoriales vigentes y otras que, establezcan las condiciones mínimas de manejo de lodos y las instalaciones para su disposición final.

### **CAPÍTULO V**

#### **LABORATORIOS**

##### **Artículo 34.- Laboratorios**

34.1 Los laboratorios nacionales o extranjeros, debidamente acreditados de acuerdo a la normativa vigente, son los únicos que pueden evaluar y analizar las muestras de biosólidos producidos para la medición de los parámetros establecidos en el presente Reglamento.

34.2 Las autoridades sectoriales están facultadas para contratar laboratorios nacionales o extranjeros para la realización de actividades de monitoreo, supervisión y fiscalización, sin perjuicio de que cuenten con un órgano interno que realice dicha función.

34.3 Los agentes involucrados con la producción y el reaprovechamiento de biosólidos están obligados a realizar la evaluación y monitoreo interno que consideren necesarios con laboratorios nacionales o extranjeros, a fin de acreditar el cumplimiento de los parámetros del presente Reglamento.

### **CAPÍTULO VI**

#### **SUPERVISIÓN Y FISCALIZACIÓN APLICABLE A LOS AGENTES ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN Y EL REAPROVECHAMIENTO DE BIOSÓLIDOS**

##### **Artículo 35.- Supervisión y fiscalización**

35.1 El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, a través de la DGAA, ejerce las funciones de supervisión y fiscalización en el ámbito de sus competencias, conforme a la normativa de la materia para asegurar el cumplimiento del presente Reglamento.

35.2 El incumplimiento de las obligaciones estipuladas en el presente Reglamento, constituye infracción administrativa la cual es sancionada por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, a través de la DGAA, de conformidad con la normativa aplicable.

##### **Artículo 36.- Instrumentos complementarios para la supervisión**

36.1 La función de supervisión comprende el ejercicio de acciones destinadas a verificar el cumplimiento de las disposiciones del presente Reglamento por parte de los agentes asociados a la producción y al reaprovechamiento de biosólidos provenientes de la estabilización de lodos de la PTAR.

36.2 Las autoridades sectoriales, para supervisar el cumplimiento de las disposiciones del presente Reglamento, en el marco de sus competencias, se valdrán de modo complementario de los instrumentos siguientes:

1. Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos.
2. Ficha de Entrega de Biosólido.
3. Recolección de muestras in situ y evaluación en laboratorios especializados debidamente acreditados.
4. Otros documentos, que establezcan los sectores competentes a través de normas complementarias.

#### **DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS FINALES**

##### **PRIMERA.- Creación del Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos**

Créase el Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos, el cual se encuentra a cargo de la DGAA del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento emite la norma complementaria necesaria para regular el procedimiento aplicable para la implementación del Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos, la cual se efectúa en un plazo máximo de treinta (30) días hábiles, contados a partir del día hábil siguiente de publicada la presente norma en el diario oficial El Peruano.

##### **SEGUNDA.- Manejo de los Biosólidos generados en el servicio de tratamiento de aguas residuales**

Las disposiciones aplicables a los procesos y operaciones asociadas al manejo de los biosólidos se establecen en la Resolución Ministerial que aprueba las condiciones mínimas de manejo de lodos y las instalaciones para su disposición final.

##### **TERCERA.- Aplicación supletoria**

Para lo no previsto en el presente Reglamento se aplica de forma supletoria el Texto Único Ordenado de la Ley N° 27444, Ley del Procedimiento Administrativo General, aprobado por Decreto Supremo N° 008-2017-JUS y la normativa vigente referida a la gestión y manejo de residuos sólidos.

##### **CUARTA.- Periodo de adecuación**

Los laboratorios nacionales o extranjeros deben obtener la acreditación de los métodos de ensayo correspondientes de acuerdo a las normas del Sistema Nacional para la Calidad, adecuándose a las exigencias establecidas en el presente Reglamento y sus normas complementarias en un plazo máximo de tres (3) años, contado a partir de la publicación del protocolo de monitoreo, a cargo del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

Durante dicho plazo los prestadores de servicios de saneamiento pueden certificar los parámetros de los biosólidos previstos en el presente Reglamento mediante laboratorios nacionales o extranjeros que no cuenten con los métodos de ensayo acreditados.

##### **QUINTA.- Aprobación de normas complementarias del presente Reglamento**

El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento en el término de ciento ochenta (180) días calendario aprueba, mediante Resolución Ministerial el protocolo de monitoreo de biosólidos. Durante dicho plazo, los productores de biosólidos pueden solicitar su inscripción en el Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos adjuntando el resultado del monitoreo expedido por los laboratorios.

1536004-7

## 7.2. Informes de análisis microbiológico

### 7.2.1. Primer informe de laboratorio – 09 febrero 2024



## LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC – INF – 1 A – 2024

### Informe de Laboratorio

#### Análisis de Lodos

#### I. Información Preliminar:

|                                    |                                                                                                |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Solicitante:                       | Efraín Humberto Quintanilla Castro                                                             |
| DNI/RUC                            | 10416132084                                                                                    |
| Correo                             | <a href="mailto:efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com">efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com</a> |
| Servicio Solicitado:               | Análisis de Lodos                                                                              |
| Procedencia:                       | Celendín                                                                                       |
| Código registro de laboratorio:    | M (1-4)                                                                                        |
| Número de muestras                 | 4                                                                                              |
| Condiciones de la muestra:         | Muestra Tomada por el Solicitante                                                              |
| Fecha de muestreo:                 | 09/02/2024                                                                                     |
| Fecha de recepción en laboratorio: | 09/02/2024                                                                                     |
| Fecha de análisis:                 | 09/02/2024                                                                                     |
| Fecha entrega de resultados:       | 15/02/2024                                                                                     |

#### II. Información de la Muestras:

|                    |                     |                            |                               |
|--------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Tipo de envase     | Frasco de Plástico  | Condiciones de la muestra: | Muestra Tomada por el Usuario |
| Tipo de muestra    | Lodos Deshidratados | Temperatura de recepción   | Temperatura ambiente          |
| Volumen de muestra | 250 g aprox.        | Detalle de Muestras        | Grupo 1                       |

#### III. Información de los análisis:

| Método                                            | LCM        | Referencia                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>            | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9222D: Standard Total Coliform Membrane Filter Procedure. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.                     |
| <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup>      | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9221: Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. |
| <i>Huevos Viables de helmintos</i> <sup>(c)</sup> | 1 HVH/ 4 g | Adaptación del método EPA. (2003). "Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge." United States Environmental Protection Agency. EPA/625/R-92/013. Quantification of viable helminth eggs in samples of sewage sludge                          |

LCM: Limite de cuantificación del método.

UFC/g: Unidades formadoras de colonias por gramo de muestra procesada.

NMP/g: Numero más probable de bacterias por gramo de muestra procesada.

HVH/ 4 g: Huevos viables de Helmintos por 4 gramos de muestra procesada.

Nota: Las metodologías utilizadas han sido adaptadas a partir de métodos estandarizados y acreditados para los parámetros analizados

Pág. 1 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: [biomic1640@gmail.com](mailto:biomic1640@gmail.com)  
Cajamarca – Perú

**IV. Resultados de análisis:**

| Nº | Código Muestra | Código Lab. | Parámetro                                    | Resultado    |
|----|----------------|-------------|----------------------------------------------|--------------|
| 1  | G1-M1-R1       | M1          | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 29030 NMP/g  |
| 2  |                |             | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 281900 NMP/g |
| 3  |                |             | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 270 HVH/ 4 g |
| 4  | G1-M2-R1       | M2          | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 5300 NMP/g   |
| 5  |                |             | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 60000 NMP/g  |
| 6  |                |             | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 80 HVH/ 4 g  |
| 7  | G1-M3-R1       | M3          | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 36 NMP/g     |
| 8  |                |             | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 0 NMP/g      |
| 9  |                |             | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 2 HVH/ 4 g   |
| 10 | G1-M4-R1       | M4          | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 0 NMP/g      |
| 11 |                |             | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 0 NMP/g      |
| 12 |                |             | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 0 HVH/ 4 g   |



**LABORATORIOS BIOMIC  
SRL**

RUC: 20607573531  
RMC - INF - I A - 2024

**V. Observaciones:**

(\*) Las equivalencias entre UFC/g y NMP/g fueron calculadas a través de la siguiente expresión:

$$NMP/g = C \times D$$

Donde:

NMP/g= Numero más probable de bacterias por gramo

C= Unidades Formadoras de colonias / gramo

D=Dilución de recuento.

Analista:

  
  
Quispe Cruz Betty Rosemary  
Biólogo.  
C.B.P. 16384

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME  
VÁLIDO SOLO PARA LAS MUESTRAS ANALIZADAS  
Pág. 3 de 3

**Dirección:** Av. Hoyos Rubio 1640 **Contacto:** 901473381 **Email:** biomic1640@gmail.com  
Cajamarca – Perú

## 7.2.2. Segundo informe de laboratorio – 21 febrero 2024



### LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC – INF – I A – 2024

### Informe de Laboratorio

#### Análisis de Lodos

#### I. Información Preliminar:

Solicitante: Efraín Humberto Quintanilla Castro  
DNI/RUC: 10416132084  
Correo: [efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com](mailto:efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com)  
Servicio Solicitado: Análisis de Lodos  
Procedencia: Celendín  
Código registro de laboratorio: M (1-4)  
Número de muestras: 4  
Condiciones de la muestra: Muestra Tomada por el Solicitante  
Fecha de muestreo: 21/02/2024  
Fecha de recepción en laboratorio: 21/02/2024  
Fecha de análisis: 21/02/2024  
Fecha entrega de resultados: 27/02/2024

#### II. Información de la Muestras:

| Tipo de envase     | Frasco de Plástico  | Condiciones de la muestra: | Muestra Tomada por el Usuario |
|--------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Tipo de muestra    | Lodos Deshidratados | Temperatura de recepción   | Temperatura ambiente          |
| Volumen de muestra | 250 g aprox.        | Detalle de Muestras        | Grupo 1                       |

#### III. Información de los análisis:

| Método                                            | LCM        | Referencia                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>            | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9222D: Standard Total Coliform Membrane Filter Procedure. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.                     |
| <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup>      | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9221: Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. |
| <i>Huevos Viables de helmintos</i> <sup>(c)</sup> | 1 HVH/ 4 g | Adaptación del método EPA. (2003). "Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge." United States Environmental Protection Agency. EPA/625/R-92/013. Quantification of viable helminth eggs in samples of sewage sludge                          |

**LCM:** Limite de cuantificación del método.

**UFC/g:** Unidades formadoras de colonias por gramo de muestra procesada.

**NMP/g:** Numero más probable de bacterias por gramo de muestra procesada.

**HVH/ 4 g:** Huevos viables de Helmintos por 4 gramos de muestra procesada.

**Nota:** Las metodologías utilizadas han sido adaptadas a partir de métodos estandarizados y acreditados para los parámetros analizados

Pág. 1 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: [biomic1640@gmail.com](mailto:biomic1640@gmail.com)  
Cajamarca – Perú

**IV. Resultados de análisis:**

| Nº | Código Muestra | Código Lab. | Parámetro                                    | Resultado    |
|----|----------------|-------------|----------------------------------------------|--------------|
| 1  | G1-M1-R2       | M1          | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 25440 NMP/g  |
| 2  |                |             | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 252000 NMP/g |
| 3  |                |             | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 197 HVH/ 4 g |
| 4  | G1-M2-R2       | M2          | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 5450 NMP/g   |
| 5  |                |             | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 65000 NMP/g  |
| 6  |                |             | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 58 HVH/ 4 g  |
| 7  | G1-M3-R2       | M3          | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 12 NMP/g     |
| 8  |                |             | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 350 NMP/g    |
| 9  |                |             | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 6 HVH/ 4 g   |
| 10 | G1-M4-R2       | M4          | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 0 NMP/g      |
| 11 |                |             | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 0 NMP/g      |
| 12 |                |             | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 0 HVH/ 4 g   |

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME  
VÁLIDO SOLO PARA LAS MUESTRAS ANALIZADAS

Pág. 2 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: biomic1640@gmail.com  
Cañamara – Perú



## LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC - INF - 1 A - 2024

### V. Observaciones:

(\*) Las equivalencias entre UFC/g y NMP/g fueron calculadas a través de la siguiente expresión:

$$NMP/g = C \times D$$

Donde:

NMP/g= Numero más probable de bacterias por gramo

C= Unidades Formadoras de colonias / gramo

D=Dilución de recuento.

Analista:

  
  
Quispe Cruz Baby Rosemary  
Biólogo  
C.B.P. 16384

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME  
VÁLIDO SOLO PARA LAS MUESTRAS ANALIZADAS  
Pág. 3 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: biomic1640@gmail.com  
Catamarca – Perú

### 7.2.3. Tercer informe de laboratorio – 06 marzo 2024



## LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC – INF – I Δ – 2024

### Informe de Laboratorio

#### Análisis de Lodos

#### I. Información Preliminar:

|                                    |                                                                                                |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Solicitante:                       | Efraín Humberto Quintanilla Castro                                                             |
| DNI/RUC                            | 10416132084                                                                                    |
| Correo                             | <a href="mailto:efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com">efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com</a> |
| Servicio Solicitado:               | Análisis de Lodos                                                                              |
| Procedencia:                       | Celendín                                                                                       |
| Código registro de laboratorio:    | M (1-4)                                                                                        |
| Numero de muestras                 | 4                                                                                              |
| Condiciones de la muestra:         | Muestra Tomada por el Solicitante                                                              |
| Fecha de muestreo:                 | 06/03/2024                                                                                     |
| Fecha de recepción en laboratorio: | 06/03/2024                                                                                     |
| Fecha de análisis:                 | 06/03/2024                                                                                     |
| Fecha entrega de resultados:       | 13/03/2024                                                                                     |

#### II. Información de la Muestras:

| Tipo de envase     | Frasco de Plástico  | Condiciones de la muestra: | Muestra Tomada por el Usuario |
|--------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Tipo de muestra    | Lodos Deshidratados | Temperatura de recepción   | Temperatura ambiente          |
| Volumen de muestra | 250 g aprox.        | Detalle de Muestras        | Grupo 2                       |

#### III. Información de los análisis:

| Método                                            | LCM        | Referencia                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>            | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9222D: Standard Total Coliform Membrane Filter Procedure. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.                     |
| <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup>      | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9221: Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. |
| <i>Huevos Viables de helmintos</i> <sup>(c)</sup> | 1 HVH/ 4 g | Adaptación del método EPA. (2003). "Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge." United States Environmental Protection Agency. EPA/625/R-92/013. Quantification of viable helminth eggs in samples of sewage sludge                          |

LCM: Limite de cuantificación del método.

UFC/g: Unidades formadoras de colonias por gramo de muestra procesada.

NMP/g: Numero más probable de bacterias por gramo de muestra procesada.

HVH/ 4 g: Huevos viables de Helmintos por 4 gramos de muestra procesada.

Nota: Las metodologías utilizadas han sido adaptadas a partir de métodos estandarizados y acreditados para los parámetros analizados

Pág. 1 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: [biomic1640@gmail.com](mailto:biomic1640@gmail.com)  
Caiaamarca – Perú

**IV. Resultados de análisis:**

| Nº | Código Muestra | Código Lab | Parámetro                                    | Resultado    |
|----|----------------|------------|----------------------------------------------|--------------|
| 1  | G2-T1-R3       | M1         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 28000 NMP/g  |
| 2  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 243000 NMP/g |
| 3  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 256 HVH/ 4 g |
| 4  | G2-T2-R3       | M2         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 5300 NMP/g   |
| 5  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 67000 NMP/g  |
| 6  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 88 HVH/ 4 g  |
| 7  | G2-T3-R3       | M3         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 23 NMP/g     |
| 8  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 400 NMP/g    |
| 9  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 10 HVH/ 4 g  |
| 10 | G2-T4-R3       | M4         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 0 NMP/g      |
| 11 |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 0 NMP/g      |
| 12 |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 0 HVH/ 4 g   |



**LABORATORIOS BIOMIC  
SRL**

RUC: 20607573531  
RMC - INF - 1 Δ - 2024

**V. Observaciones:**

(\*) Las equivalencias entre UFC/g y NMP/g fueron calculadas a través de la siguiente expresión:

$$NMP/g = C \times D$$

Donde:

NMP/g= Numero más probable de bacterias por gramo

C= Unidades Formadoras de colonias / gramo

D=Dilución de recuento.

Analista:

  
  
Guispe Cruz Baby Rosemary  
Biólogo  
C.B.P. 16384

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME  
VÁLIDO SOLO PARA LAS MUESTRAS ANALIZADAS

Pág. 3 de 3

**Dirección:** Av. Hoyos Rubio 1640 **Contacto:** 901473381 **Email:** biomic1640@gmail.com  
Cajamarca – Perú

## 7.2.4. Cuarto informe de laboratorio – 20 marzo 2024



### LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC – INF – I Δ – 2024

### Informe de Laboratorio

#### Análisis de Lodos

#### I. Información Preliminar:

Solicitante: Efraín Humberto Quintanilla Castro  
DNI/RUC: 10416132084  
Correo: [efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com](mailto:efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com)  
Servicio Solicitado: Análisis de Lodos  
Procedencia: Celendín  
Código registro de laboratorio: M (1-4)  
Número de muestras: 4  
Condiciones de la muestra: Muestra Tomada por el Solicitante  
Fecha de muestreo: 20/03/2024  
Fecha de recepción en laboratorio: 20/03/2024  
Fecha de análisis: 20/03/2024  
Fecha entrega de resultados: 26/03/2024

#### II. Información de la Muestras:

|                    |                     |                            |                               |
|--------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Tipo de envase     | Frasco de Plástico  | Condiciones de la muestra: | Muestra Tomada por el Usuario |
| Tipo de muestra    | Lodos Deshidratados | Temperatura de recepción   | Temperatura ambiente          |
| Volumen de muestra | 250 g aprox.        | Detalle de Muestras        | Grupo 2                       |

#### III. Información de los análisis:

| Método                                            | LCM        | Referencia                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>            | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9222D: Standard Total Coliform Membrane Filter Procedure. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.                     |
| <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup>      | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9221: Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. |
| <i>Huevos Viables de helmintos</i> <sup>(c)</sup> | 1 HVH/ 4 g | Adaptación del método EPA. (2003). "Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge." United States Environmental Protection Agency, EPA/625/R-92/013. Quantification of viable helminth eggs in samples of sewage sludge                          |

LCM: Limite de cuantificación del método.

UFC/g: Unidades formadoras de colonias por gramo de muestra procesada.

NMP/g: Numero más probable de bacterias por gramo de muestra procesada.

HVH/ 4 g: Huevos viables de Helmintos por 4 gramos de muestra procesada.

Nota: Las metodologías utilizadas han sido adaptadas a partir de métodos estandarizados y acreditados para los parámetros analizados

Pág. 1 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: [biomic1640@gmail.com](mailto:biomic1640@gmail.com)  
Cajamarca – Perú

**IV. Resultados de análisis:**

| Nº | Código Muestra | Código Lab | Parámetro                                    | Resultado    |
|----|----------------|------------|----------------------------------------------|--------------|
| 1  | G2-T1-R4       | M1         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 20150 NMP/g  |
| 2  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 183000 NMP/g |
| 3  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 350 HVH/ 4 g |
| 4  | G2-T2-R4       | M2         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 5000 NMP/g   |
| 5  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 62000 NMP/g  |
| 6  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 80 HVH/ 4 g  |
| 7  | G2-T3-R4       | M3         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 53 NMP/g     |
| 8  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 550 NMP/g    |
| 9  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 14 HVH/ 4 g  |
| 10 | G2-T4-R4       | M4         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 0 NMP/g      |
| 11 |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 0 NMP/g      |
| 12 |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 0 HVH/ 4 g   |



## LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC - INF - 1 Δ - 2024

### V. Observaciones:

(\*) Las equivalencias entre UFC/g y NMP/g fueron calculadas a través de la siguiente expresión:

$$NMP/g = C \times D$$

Donde:

NMP/g= Numero más probable de bacterias por gramo

C= Unidades Formadoras de colonias / gramo

D=Dilución de recuento.

Analista:

  
  
Quispe Cruz Baby Rosemary  
Biólogo  
C.B.P. 16384

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME  
VÁLIDO SOLO PARA LAS MUESTRAS ANALIZADAS  
Pág. 3 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: biomic1640@gmail.com  
Cañamarca - Perú

## 7.2.5. Quinto informe de laboratorio – 04 abril 2024



### LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC – INF – I A – 2024

### Informe de Laboratorio

#### Análisis de Lodos

#### I. Información Preliminar:

|                                    |                                                                                                |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Solicitante:                       | Efraín Humberto Quintanilla Castro                                                             |
| DNI/RUC                            | 10416132084                                                                                    |
| Correo                             | <a href="mailto:efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com">efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com</a> |
| Servicio Solicitado:               | Análisis de Lodos                                                                              |
| Procedencia:                       | Celendín                                                                                       |
| Código registro de laboratorio:    | M (1-4)                                                                                        |
| Numero de muestras                 | 4                                                                                              |
| Condiciones de la muestra:         | Muestra Tomada por el Solicitante                                                              |
| Fecha de muestreo:                 | 04/04/2024                                                                                     |
| Fecha de recepción en laboratorio: | 04/04/2024                                                                                     |
| Fecha de análisis:                 | 04/04/2024                                                                                     |
| Fecha entrega de resultados:       | 10/04/2024                                                                                     |

#### II. Información de la Muestras:

| Tipo de envase     | Frasco de Plástico  | Condiciones de la muestra: | Muestra Tomada por el Usuario |
|--------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Tipo de muestra    | Lodos Deshidratados | Temperatura de recepción   | Temperatura ambiente          |
| Volumen de muestra | 250 g aprox.        | Detalle de Muestras        | Grupo 3                       |

#### III. Información de los análisis:

| Método                                            | LCM        | Referencia                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>            | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9222D: Standard Total Coliform Membrane Filter Procedure. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.                     |
| <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup>      | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9221: Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. |
| <i>Huevos Viables de helmintos</i> <sup>(c)</sup> | 1 HVH/ 4 g | Adaptación del método EPA. (2003). "Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge." United States Environmental Protection Agency. EPA/625/R-92/013. Quantification of viable helminth eggs in samples of sewage sludge                          |

LCM: Limite de cuantificación del método.

UFC/g: Unidades formadoras de colonias por gramo de muestra procesada.

NMP/g: Numero más probable de bacterias por gramo de muestra procesada.

HVH/ 4 g: Huevos viables de Helmintos por 4 gramos de muestra procesada.

Nota: Las metodologías utilizadas han sido adaptadas a partir de métodos estandarizados y acreditados para los parámetros analizados

Pág. 1 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: [biomic1640@gmail.com](mailto:biomic1640@gmail.com)  
Cajamarca – Perú

**IV. Resultados de análisis:**

| Nº | Código Muestra | Código Lab | Parámetro                                    | Resultado    |
|----|----------------|------------|----------------------------------------------|--------------|
| 1  | G3-T1.R5       | M1         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 25000 NMP/g  |
| 2  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 253000 NMP/g |
| 3  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 270 HVH/ 4 g |
| 4  | G3-T2.R5       | M2         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 6130 NMP/g   |
| 5  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 51600 NMP/g  |
| 6  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 72 HVH/ 4 g  |
| 7  | G3-T3.R5       | M3         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 30 NMP/g     |
| 8  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 360 NMP/g    |
| 9  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 12 HVH/ 4 g  |
| 10 | G3-T4.R5       | M4         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 0 NMP/g      |
| 11 |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 0 NMP/g      |
| 12 |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 0 HVH/ 4 g   |



## LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC - INF - I A - 2024

### V. Observaciones:

(\*) Las equivalencias entre UFC/g y NMP/g fueron calculadas a través de la siguiente expresión:

$$NMP/g = C \times D$$

Donde:

NMP/g= Numero más probable de bacterias por gramo

C= Unidades Formadoras de colonias / gramo

D=Dilución de recuento.

Analista:

  
  
Quisque Cruz Betty Rosemary  
Biólogo  
C.B.P. 16384

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME  
VÁLIDO SOLO PARA LAS MUESTRAS ANALIZADAS  
Pág. 3 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: biomic1640@gmail.com  
Cajamarca – Perú

## 7.2.6. Sexto informe de laboratorio – 17 abril 2024



### LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC – INF – I & – 7074

### Informe de Laboratorio

#### Análisis de Lodos

#### I. Información Preliminar:

|                                    |                                                                                                |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Solicitante:                       | Efraín Humberto Quintanilla Castro                                                             |
| DNI/RUC                            | 10416132084                                                                                    |
| Correo                             | <a href="mailto:efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com">efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com</a> |
| Servicio Solicitado:               | Análisis de Lodos                                                                              |
| Procedencia:                       | Celendín                                                                                       |
| Código registro de laboratorio:    | M (1-4)                                                                                        |
| Número de muestras                 | 4                                                                                              |
| Condiciones de la muestra:         | Muestra Tomada por el Solicitante                                                              |
| Fecha de muestreo:                 | 17/04/2024                                                                                     |
| Fecha de recepción en laboratorio: | 17/04/2024                                                                                     |
| Fecha de análisis:                 | 17/04/2024                                                                                     |
| Fecha entrega de resultados:       | 23/04/2024                                                                                     |

#### II. Información de la Muestras:

|                    |                     |                            |                               |
|--------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Tipo de envase     | Frasco de Plástico  | Condiciones de la muestra: | Muestra Tomada por el Usuario |
| Tipo de muestra    | Lodos Deshidratados | Temperatura de recepción   | Temperatura ambiente          |
| Volumen de muestra | 250 g aprox.        | Detalle de Muestras        | Grupo 3                       |

#### III. Información de los análisis:

| Método                                            | LCM        | Referencia                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>            | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9222D: Standard Total Coliform Membrane Filter Procedure. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.                     |
| <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup>      | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9221: Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. |
| <i>Huevos Viables de helmintos</i> <sup>(c)</sup> | 1 HVH/ 4 g | Adaptación del método EPA. (2003). "Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge." United States Environmental Protection Agency. EPA/625/R-92/013. Quantification of viable helminth eggs in samples of sewage sludge                          |

LCM: Limite de cuantificación del método.

UFC/g: Unidades formadoras de colonias por gramo de muestra procesada.

NMP/g: Numero más probable de bacterias por gramo de muestra procesada.

HVH/ 4 g: Huevos viables de Helmintos por 4 gramos de muestra procesada.

Nota: Las metodologías utilizadas han sido adaptadas a partir de métodos estandarizados y acreditados para los parámetros analizados

Pág. 1 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: [biomic1640@gmail.com](mailto:biomic1640@gmail.com)  
Cajamarca – Perú



# LABORATORIOS BIONIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC – INF – I Δ – 2024

## IV. Resultados de análisis:

| Nº | Código Muestra | Código Lab | Parámetro                                    | Eq. NMP (°)  |
|----|----------------|------------|----------------------------------------------|--------------|
| 1  | G3-T1.R6       | M1         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 21100 NMP/g  |
| 2  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 323600 NMP/g |
| 3  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 246 HVH/ 4 g |
| 4  | G3-T1.R6       | M2         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 5620 NMP/g   |
| 5  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 35000 NMP/g  |
| 6  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 98 HVH/ 4 g  |
| 7  | G3-T2.R6       | M3         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 34 NMP/g     |
| 8  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 380 NMP/g    |
| 9  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 16 HVH/ 4 g  |
| 10 | G3-T2.R6       | M4         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 0 NMP/g      |
| 11 |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 0 NMP/g      |
| 12 |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 0 HVH/ 4 g   |

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME  
VÁLIDO SOLO PARA LAS MUESTRAS ANALIZADAS  
Pag. 2 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: bionic1640@gmail.com  
Cajamarca – Perú



## LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC - INF - I Δ - 2024

### V. Observaciones:

(\*) Las equivalencias entre UFC/g y NMP/g fueron calculadas a través de la siguiente expresión:

$$NMP/g = C \times D$$

Donde:

NMP/g= Numero más probable de bacterias por gramo

C= Unidades Formadoras de colonias / gramo

D=Dilución de recuento.

Analista:

  
  
Guispe Cruz Baby Rosemary  
Biólogo  
C.B.P. 16384

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME  
VÁLIDO SOLO PARA LAS MUESTRAS ANALIZADAS

Pág. 3 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: biomic1640@gmail.com  
Cajamarca – Perú

## 7.2.7. Séptimo informe de laboratorio – 03 mayo 2024



### LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC – INF – I.A. – 2024

### Informe de Laboratorio

#### Análisis de Lodos

#### I. Información Preliminar:

|                                    |                                                                                                |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Solicitante:                       | Efrain Humberto Quintanilla Castro                                                             |
| DNI/RUC                            | 10416132084                                                                                    |
| Correo                             | <a href="mailto:efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com">efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com</a> |
| Servicio Solicitado:               | Análisis de Lodos                                                                              |
| Procedencia:                       | Celendin                                                                                       |
| Código registro de laboratorio:    | M (1-4)                                                                                        |
| Numero de muestras                 | 4                                                                                              |
| Condiciones de la muestra:         | Muestra Tomada por el Solicitante                                                              |
| Fecha de muestreo:                 | 03/05/2024                                                                                     |
| Fecha de recepción en laboratorio: | 03/05/2024                                                                                     |
| Fecha de análisis:                 | 03/05/2024                                                                                     |
| Fecha entrega de resultados:       | 09/05/2024                                                                                     |

#### II. Información de la Muestras:

|                    |                     |                            |                               |
|--------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Tipo de envase     | Frasco de Plástico  | Condiciones de la muestra: | Muestra Tomada por el Usuario |
| Tipo de muestra    | Lodos Deshidratados | Temperatura de recepción   | Temperatura ambiente          |
| Volumen de muestra | 250 g aprox.        | Detalle de Muestras        | Grupo 4                       |

#### III. Información de los análisis:

| Método                                            | LCM        | Referencia                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>            | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9222D: Standard Total Coliform Membrane Filter Procedure. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.                     |
| <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup>      | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9221: Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. |
| <i>Huevos Viables de helmintos</i> <sup>(c)</sup> | 1 HVH/ 4 g | Adaptación del método EPA. (2003). "Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge." United States Environmental Protection Agency. EPA/625/R-92/013. Quantification of viable helminth eggs in samples of sewage sludge                          |

LCM: Limite de cuantificación del método.

UFC/g: Unidades formadoras de colonias por gramo de muestra procesada.

NMP/g: Numero más probable de bacterias por gramo de muestra procesada.

HVH/ 4 g: Huevos viables de Helmintos por 4 gramos de muestra procesada.

Nota: Las metodologías utilizadas han sido adaptadas a partir de métodos estandarizados y acreditados para los parámetros analizados

Pág. 1 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: [biomic1640@gmail.com](mailto:biomic1640@gmail.com)  
Cajamarca – Perú

**IV. Resultados de análisis:**

| Nº | Código Muestra | Código Lab | Parámetro                                    | Resultado    |
|----|----------------|------------|----------------------------------------------|--------------|
| 1  | G4-T1-R7       | M1         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 30000 NMP/g  |
| 2  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 212000 NMP/g |
| 3  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 272 HVH/ 4 g |
| 7  | G4-T2-R7       | M2         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 6340 NMP/g   |
| 8  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 72000 NMP/g  |
| 9  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 72 HVH/ 4 g  |
| 13 | G4-T3-R7       | M3         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 48 NMP/g     |
| 14 |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 590 NMP/g    |
| 15 |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 20 HVH/ 4 g  |
| 19 | G4-T4-R7       | M4         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 0 NMP/g      |
| 20 |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 0 NMP/g      |
| 21 |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 0 HVH/ 4 g   |



## LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC - INF - 1 A - 2024

### V. Observaciones:

(\*) Las equivalencias entre UFC/g y NMP/g fueron calculadas a través de la siguiente expresión:

$$NMP/g = C \times D$$

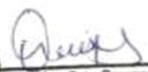
Donde:

NMP/g= Numero más probable de bacterias por gramo

C= Unidades Formadoras de colonias / gramo

D=Dilución de recuento.

Analista:

  
  
Quispe Cruz Betsy Rosemary  
Biólogo  
C.B.P. 16384

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME  
VÁLIDO SOLO PARA LAS MUESTRAS ANALIZADAS

Pág. 3 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: biomic1640@gmail.com  
Cajamarca – Perú

## 7.2.8. Octavo informe de laboratorio – 21 mayo 2024



### LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC – INF – I A – 2024

### Informe de Laboratorio

#### Análisis de Lodos

#### I. Información Preliminar:

|                                    |                                                                                                |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Solicitante:                       | Efraín Humberto Quintanilla Castro                                                             |
| DNI/RUC:                           | 10416132084                                                                                    |
| Correo:                            | <a href="mailto:efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com">efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com</a> |
| Servicio Solicitado:               | Análisis de Lodos                                                                              |
| Procedencia:                       | Celendín                                                                                       |
| Código registro de laboratorio:    | M (1-4)                                                                                        |
| Número de muestras:                | 4                                                                                              |
| Condiciones de la muestra:         | Muestra Tomada por el Solicitante                                                              |
| Fecha de muestreo:                 | 21/05/2024                                                                                     |
| Fecha de recepción en laboratorio: | 21/05/2024                                                                                     |
| Fecha de análisis:                 | 21/05/2024                                                                                     |
| Fecha entrega de resultados:       | 27/05/2024                                                                                     |

#### II. Información de la Muestras:

|                    |                     |                            |                               |
|--------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Tipo de envase     | Frasco de Plástico  | Condiciones de la muestra: | Muestra Tomada por el Usuario |
| Tipo de muestra    | Lodos Deshidratados | Temperatura de recepción   | Temperatura ambiente          |
| Volumen de muestra | 250 g aprox.        | Detalle de Muestras        | Grupo 4                       |

#### III. Información de los análisis:

| Método                                            | LCM        | Referencia                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>            | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9222D: Standard Total Coliform Membrane Filter Procedure. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.                     |
| <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup>      | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9221: Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. |
| <i>Huevos Viables de helmintos</i> <sup>(c)</sup> | 1 HVH/ 4 g | Adaptación del método EPA. (2003). "Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge." United States Environmental Protection Agency. EPA/625/R-92/013. Quantification of viable helminth eggs in samples of sewage sludge                          |

LCM: Límite de cuantificación del método.

UFC/g: Unidades formadoras de colonias por gramo de muestra procesada.

NMP/g: Número más probable de bacterias por gramo de muestra procesada.

HVH/ 4 g: Huevos viables de Helmintos por 4 gramos de muestra procesada.

**Nota:** Las metodologías utilizadas han sido adaptadas a partir de métodos estandarizados y acreditados para los parámetros analizados

Pág. 1 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: [biomic1640@gmail.com](mailto:biomic1640@gmail.com)  
Cajamarca – Perú

**IV. Resultados de análisis:**

| Nº | Código Muestra | Código Lab | Parámetro                                    | Resultado    |
|----|----------------|------------|----------------------------------------------|--------------|
| 1  | G4-T1-R8       | M1         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 23080 NMP/g  |
| 2  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 257500 NMP/g |
| 3  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 264 HVH/ 4 g |
| 4  | G4-T2-R8       | M2         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 5910 NMP/g   |
| 5  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 61700 NMP/g  |
| 6  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 79 HVH/ 4 g  |
| 7  | G4-T3-R8       | M3         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 54 NMP/g     |
| 8  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 480 NMP/g    |
| 9  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 24 HVH/ 4 g  |
| 10 | G4-T4-R8       | M4         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 0 NMP/g      |
| 11 |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 0 NMP/g      |
| 12 |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 0 HVH/ 4 g   |



## LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC - INF - 1 A - 2024

### V. Observaciones:

(\*) Las equivalencias entre UFC/g y NMP/g fueron calculadas a través de la siguiente expresión:

$$NMP/g = C \times D$$

Donde:

NMP/g= Numero más probable de bacterias por gramo

C= Unidades Formadoras de colonias / gramo

D=Dilución de recuento.

Analista:


Quispe Cruz Betty Rosemary  
Biólogo  
C.B.P. 16384

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME  
VÁLIDO SOLO PARA LAS MUESTRAS ANALIZADAS  
Pág. 3 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: biomic1640@gmail.com  
Cajamarca - Perú

## 7.2.9. Noveno informe de laboratorio – 05 junio 2024



### LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC – INF – I A – 2024

### Informe de Laboratorio

#### Análisis de Lodos

#### I. Información Preliminar:

Solicitante: Efraín Humberto Quintanilla Castro  
DNI/RUC: 10416132084  
Correo: [efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com](mailto:efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com)  
Servicio Solicitado: Análisis de Lodos  
Procedencia: Celendín  
Código registro de laboratorio: M (1- 4)  
Número de muestras: 4  
Condiciones de la muestra: Muestra Tomada por el Solicitante  
Fecha de muestreo: 05/06/2024  
Fecha de recepción en laboratorio: 05/06/2024  
Fecha de análisis: 05/06/2024  
Fecha entrega de resultados: 11/06/2024

#### II. Información de la Muestras:

|                    |                     |                            |                               |
|--------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Tipo de envase     | Frasco de Plástico  | Condiciones de la muestra: | Muestra Tomada por el Usuario |
| Tipo de muestra    | Lodos Deshidratados | Temperatura de recepción   | Temperatura ambiente          |
| Volumen de muestra | 250 g aprox.        | Detalle de Muestras        | Grupo 5                       |

#### III. Información de los análisis:

| Método                                            | LCM        | Referencia                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>            | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9222D: Standard Total Coliform Membrane Filter Procedure. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.                     |
| <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup>      | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9221: Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. |
| <i>Huevos Viables de helmintos</i> <sup>(c)</sup> | 1 HVH/ 4 g | Adaptación del método EPA. (2003). "Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge." United States Environmental Protection Agency. EPA/625/R-92/013. Quantification of viable helminth eggs in samples of sewage sludge                          |

LCM: Límite de cuantificación del método.

UFC/g: Unidades formadoras de colonias por gramo de muestra procesada.

NMP/g: Número más probable de bacterias por gramo de muestra procesada.

HVH/ 4 g: Huevos viables de Helmintos por 4 gramos de muestra procesada.

Nota: Las metodologías utilizadas han sido adaptadas a partir de métodos estandarizados y acreditados para los parámetros analizados

Pág. 1 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: [biomic1640@gmail.com](mailto:biomic1640@gmail.com)  
Cajamarca – Perú

**IV. Resultados de análisis:**

| Nº | Código Muestra | Código Lab | Parámetro                                    | Resultado    |
|----|----------------|------------|----------------------------------------------|--------------|
| 1  | G5-M1-R9       | M1         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 26000 NMP/g  |
| 2  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 245000 NMP/g |
| 3  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 253 HVH/ 4 g |
| 4  | G5-M2-R9       | M2         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 6820 NMP/g   |
| 5  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 79000 NMP/g  |
| 6  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 86 HVH/ 4 g  |
| 7  | G5-M3-R9       | M3         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 53 NMP/g     |
| 8  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 510 NMP/g    |
| 9  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 16 HVH/ 4 g  |
| 10 | G5-M4-R9       | M4         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 0 NMP/g      |
| 11 |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 0 NMP/g      |
| 12 |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 0 HVH/ 4 g   |

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME  
VÁLIDO SOLO PARA LAS MUESTRAS ANALIZADAS

Pág. 2 de 3

**Dirección:** Av. Hoyos Rubio 1640 **Contacto:** 901473381 **Email:** biomic1640@gmail.com  
Cajamarca – Perú



## LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC - INF - I A - 2024

### V. Observaciones:

(\*) Las equivalencias entre UFC/g y NMP/g fueron calculadas a través de la siguiente expresión:

$$NMP/g = C \times D$$

Donde:

NMP/g= Numero más probable de bacterias por gramo

C= Unidades Formadoras de colonias / gramo

D=Dilución de recuento.

Analista:

  
  
Quispe Cruz Baby Rosemary  
Biólogo  
C.B.P. 16384

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME  
VÁLIDO SOLO PARA LAS MUESTRAS ANALIZADAS

Pág. 3 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: biomic1640@gmail.com  
Cajamarca – Perú

## 7.2.10. Décimo informe de laboratorio – 20 junio 2024



### LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC – INF – I & – 2024

### Informe de Laboratorio

#### Análisis de Lodos

#### I. Información Preliminar:

Solicitante: Efraín Humberto Quintanilla Castro  
DNI/RUC: 10416132084  
Correo: [efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com](mailto:efrain.quintanilla.trabajo@gmail.com)  
Servicio Solicitado: Análisis de Lodos  
Procedencia: Celendín  
Código registro de laboratorio: M (01-04)  
Número de muestras: 4  
Condiciones de la muestra: Muestra Tomada por el Solicitante  
Fecha de muestreo: 20/06/2024  
Fecha de recepción en laboratorio: 20/06/2024  
Fecha de análisis: 20/06/2024  
Fecha entrega de resultados: 27/06/2024

#### II. Información de la Muestras:

| Tipo de envase     | Frasco de Plástico  | Condiciones de la muestra: | Muestra Tomada por el Usuario |
|--------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Tipo de muestra    | Lodos Deshidratados | Temperatura de recepción   | Temperatura ambiente          |
| Volumen de muestra | 250 g aprox.        | Detalle de Muestras        | Grupo 5                       |

#### III. Información de los análisis:

| Método                                            | LCM        | Referencia                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>            | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9222D: Standard Total Coliform Membrane Filter Procedure. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.                     |
| <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup>      | 1 UFC/g    | Adaptación del método APHA. (2022). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24rd Edition. Method 9221: Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. |
| <i>Huevos Viables de helmintos</i> <sup>(c)</sup> | 1 HVH/ 4 g | Adaptación del método EPA. (2003). "Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge." United States Environmental Protection Agency. EPA/625/R-92/013. Quantification of viable helminth eggs in samples of sewage sludge                          |

LCM: Limite de cuantificación del método.

UFC/g: Unidades formadoras de colonias por gramo de muestra procesada.

NMP/g: Numero más probable de bacterias por gramo de muestra procesada.

HVH/ 4 g: Huevos viables de Helmintos por 4 gramos de muestra procesada.

Nota: Las metodologías utilizadas han sido adaptadas a partir de métodos estandarizados y acreditados para los parámetros analizados

Pág. 1 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: [biomic1640@gmail.com](mailto:biomic1640@gmail.com)  
Cajamarca – Perú



# LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC - INF - I A - 2024

## IV. Resultados de análisis:

| Nº | Código Muestra | Código Lab | Parámetro                                    | Resultado    |
|----|----------------|------------|----------------------------------------------|--------------|
| 1  | G5-M1-R10      | M1         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 31000 NMP/g  |
| 2  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 199000 NMP/g |
| 3  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 201 HVH/ 4 g |
| 4  | G5-M2-R10      | M2         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 7850 NMP/g   |
| 5  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 55000 NMP/g  |
| 6  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 85 HVH/ 4 g  |
| 7  | G5-M3-R10      | M3         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 70 NMP/g     |
| 8  |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 278 NMP/g    |
| 9  |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 16 HVH/ 4 g  |
| 10 | G5-M4-R10      | M4         | <i>Escherichia coli</i> <sup>(a)</sup>       | 0 NMP/g      |
| 11 |                |            | <i>Enterobacter aerogenes</i> <sup>(b)</sup> | 0 NMP/g      |
| 12 |                |            | Huevos Viables de helmintos <sup>(c)</sup>   | 0 HVH/ 4 g   |

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME  
VÁLIDO SOLO PARA LAS MUESTRAS ANALIZADAS  
Pág. 2 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: biomic1640@gmail.com  
Cajamarca – Perú



## LABORATORIOS BIOMIC SRL

RUC: 20607573531  
RMC - INF - I A - 2024

### V. Observaciones:

(\*) Las equivalencias entre UFC/g y NMP/g fueron calculadas a través de la siguiente expresión:

$$NMP/g = C \times D$$

Donde:

NMP/g= Numero más probable de bacterias por gramo

C= Unidades Formadoras de colonias / gramo

D=Dilución de recuento.

Analista:

  
 Quispe Cruz Beby Rosemary  
Biólogo  
C.B.P. 16384

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME  
VÁLIDO SOLO PARA LAS MUESTRAS ANALIZADAS  
Pág. 3 de 3

Dirección: Av. Hoyos Rubio 1640 Contacto: 901473381 Email: biomic1640@gmail.com  
Cajamarca – Perú