



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**INGENIERÍA QUÍMICA**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS**  
**PROVENIENTES DE LA PLANTA DE AGUA POTABLE**  
**REGIONAL YANAHURCO CANTÓN MOCHA PROVINCIA**  
**TUNGURAHUA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**  
**TIPO: PROYECTO TÉCNICO**

**PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:**  
**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTOR: WASHINGTON ANDRES AROSTEGUÍ SÁNCHEZ**  
**DIRECTOR: ING. DIEGO BURBANO SALAS**

**RIOBAMBA-ECUADOR**

**2018**

**©2018, Washington Andrés Arosteguí Sánchez**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el derecho de autor.

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

El Tribunal de Trabajo de titulación certifica que: El presente trabajo técnico “DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS PROVENIENTES DE LA PLANTA DE AGUA POTABLE REGIONAL YANAHURCO CANTÓN MOCHA PROVINCIA TUNGURAHUA” de responsabilidad del señor Washington Andrés Arosteguí Sánchez ha sido revisado por los miembros del tribunal del trabajo de titulación, quedando autorizada así su presentación.

**Ing. Diego Burbano Salas** .....  
**DIRECTOR DEL TRABAJO**  
**DE TITULACIÓN**

**Dr. Segundo Trujillo** .....  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

Yo, Washington Andrés Arosteguí Sánchez, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados. Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Riobamba, 19 de febrero del 2018

Washington Andrés Arosteguí Sánchez  
060366404-6

“Yo, Washington Andrés Arosteguí Sánchez, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este trabajo de titulación, y el patrimonio intelectual del mismo pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo”

---

WASHINGTON ANDRÉS AROSTEGUÍ SÁNCHEZ

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar el más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por darme la oportunidad de aprender de grandes profesionales, y más que profesionales grandes personas, como: Mónica Andrade, Mario Villacrés, Diego Burbano, Segundo Trujillo, Natalia Moreno y de manera muy especial a mi familia por el apoyo brindado y la paciencia a lo largo de mi carrera.

Washington.

## TABLA DE CONTENIDO

|  |           |
|--|-----------|
| RESUMEN .....  | xviii     |
| SUMMARY .....  | xix       |
| <b>CAPÍTULO I</b>  |           |
| <b>1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 <b>Identificación del problema .....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.2 <b>Justificación del proyecto.....</b>   | <b>2</b>  |
| 1.3 <b>Línea de base del proyecto .....</b>  | <b>2</b>  |
| 1.3.1 <i>Fuentes de agua.....</i>  | <i>2</i>  |
| 1.3.2 <i>Reconocimiento del lugar de investigación .....</i>                                 | <i>3</i>  |
| 1.3.3 <i>Tipo de estudio .....</i>   | <i>3</i>  |
| 1.3.4 <i>Métodos.....</i>  | <i>4</i>  |
| 1.3.4.1 <i>Método inductivo .....</i>  | <i>4</i>  |
| 1.3.4.2 <i>Método analítico .....</i>  | <i>4</i>  |
| 1.3.5 <i>Técnicas de investigación .....</i>   | <i>5</i>  |
| 1.3.5.1 <i>Investigación documental .....</i>  | <i>5</i>  |
| 1.3.5.2 <i>Investigación de campo.....</i>   | <i>5</i>  |
| 1.3.6 <i>Aspectos generales de la planta de agua potable regional Yanahurco .....</i>        | <i>5</i>  |
| 1.3.6.1 <i>Descripción de la planta .....</i>  | <i>5</i>  |
| 1.3.6.2 <i>Descripción de la zona.....</i>   | <i>6</i>  |
| 1.3.6.3 <i>Formación de los lodos.....</i>   | <i>7</i>  |
| 1.3.6.4 <i>Lodo de la PTAP regional Yanahurco y su relación con el suelo en general.....</i> | <i>7</i>  |
| 1.3.6.5 <i>Capacidad de intercambio catiónico (CIC) .....</i>                                | <i>7</i>  |
| 1.3.6.6 <i>Acidez del suelo .....</i>  | <i>8</i>  |
| 1.3.6.7 <i>Causas de la acidez del suelo/lodo .....</i>                                      | <i>8</i>  |
| 1.3.6.8 <i>Exceso de hierro en el lodo.....</i>  | <i>9</i>  |
| 1.3.6.9 <i>Remoción de hierro.....</i>   | <i>9</i>  |
| 1.3.6.10 <i>Exceso de aluminio en el lodo.....</i>   | <i>10</i> |

|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| 1.3.6.11           | <i>Hidrólisis del aluminio</i>                          | 11 |
| 1.3.6.12           | <i>Aluminio intercambiable</i>                          | 12 |
| 1.3.6.13           | <i>Problemas por acidez</i>                             | 12 |
| 1.3.7              | <b><i>Muestreo de los lodos</i></b>                     | 12 |
| 1.3.7.1            | <i>Métodos de muestreo</i>                              | 13 |
| 1.3.8              | <b><i>Análisis de las muestras</i></b>                  | 14 |
| 1.3.8.1            | <i>Parámetros a analizar</i>                            | 14 |
| 1.3.9              | <b><i>Pruebas de tratabilidad</i></b>                   | 15 |
| 1.3.9.1            | <i>Recolección</i>                                      | 15 |
| 1.3.9.2            | <i>Espesamiento</i>                                     | 15 |
| 1.3.9.3            | <i>Tratamiento</i>                                      | 15 |
| 1.3.9.4            | <i>Disposición final</i>                                | 16 |
| 1.3.10             | <b><i>Otras pruebas de tratabilidad</i></b>             | 16 |
| 1.3.10.1           | <i>Aireación</i>  | 16 |
| 1.3.10.2           | <i>Encalado</i>   | 17 |
| 1.3.10.3           | <i>Requerimientos de cal</i>                            | 18 |
| 1.3.10.3.1         | <i>Cal</i>  | 18 |
| 1.3.10.4           | <i>Pureza de la cal</i>                                 | 19 |
| 1.3.10.5           | <i>Tamaño de las partículas de cal</i>                  | 20 |
| 1.3.10.6           | <i>Poder relativo de neutralización total (PRNT)</i>    | 20 |
| 1.3.10.7           | <i>Encalado de lodos</i>                                | 20 |
| 1.3.10.7.1         | <i>Beneficios del encalado</i>                          | 21 |
| 1.3.10.8           | <i>Secado</i>   | 21 |
| 1.3.11             | <b><i>Análisis de las muestras post tratamiento</i></b> | 23 |
| 1.4                | <b>Beneficiarios directos e indirectos</b>              | 25 |
| 1.4.1              | <b><i>Directos</i></b>                                  | 25 |
| 1.4.2              | <b><i>Indirectos</i></b>                                | 25 |
| <b>CAPÍTULO II</b> |   |    |
| 2                  | <b>OBJETIVOS DEL PROYECTO</b>                           | 26 |

|                     |  |    |
|---------------------|--|----|
| 2.1                 | <b>Objetivo general</b> .....  | 26 |
| 2.2                 | <b>Objetivos específicos</b> .....   | 26 |
| <b>CAPÍTULO III</b> |  |    |
| 3                   | <b>ESTUDIO TÉCNICO</b> .....   | 27 |
| 3.1                 | <b>Localización del proyecto</b> .....   | 27 |
| 3.1.1               | <i>Macro localización</i> .....  | 27 |
| 3.1.2               | <i>Localización geográfica</i> .....   | 28 |
| 3.2                 | <b>Ingeniería del proyecto</b> .....   | 28 |
| 3.2.1               | <b>Volumen de lodos generados en la PT</b> .....                                       | 29 |
| 3.2.1.1             | <i>Cálculo del volumen total de lodos en los dos sedimentadores</i> .....              | 29 |
| 3.2.1.2             | <i>Cálculo del volumen total de lodos en los dos filtros</i> .....                     | 30 |
| 3.2.1.3             | <i>Cálculo del volumen total de lodos generados por la planta de tratamiento</i> ..... | 30 |
| 3.2.2               | <b>Cálculos para el diseño</b> .....   | 30 |
| 3.2.2.1             | <i>Cálculo del diámetro del tanque 1</i> .....   | 32 |
| 3.2.2.2             | <i>Cálculo de la altura del tanque 1</i> .....   | 33 |
| 3.2.2.3             | <i>Cálculo de la altura de la llave de desfogue de agua en el tanque 1</i> .....       | 33 |
| 3.2.2.4             | <i>Cálculo del diámetro del tanque 2</i> .....   | 34 |
| 3.2.2.5             | <i>Cálculo de la altura del tanque 2</i> .....   | 34 |
| 3.2.2.6             | <i>Cálculo de la altura de la llave de desfogue de agua en el tanque 2</i> .....       | 34 |
| 3.2.2.7             | <i>Cálculo del diámetro del impulsor en el tanque 2</i> .....                          | 35 |
| 3.2.2.8             | <i>Cálculo de la distancia desde el fondo del tanque al impulsor</i> .....             | 35 |
| 3.2.2.9             | <i>Cálculo del largo de las aspas</i> .....  | 35 |
| 3.2.2.10            | <i>Cálculo del ancho de las aspas</i> .....  | 36 |
| 3.2.2.11            | <i>Cálculo del ancho de los deflectores</i> .....                                      | 36 |
| 3.2.2.12            | <i>Cálculo de la potencia requerida del impulsor</i> .....                             | 36 |
| 3.2.2.13            | <i>Cálculo del diámetro del tanque 3</i> .....   | 41 |
| 3.2.2.14            | <i>Cálculo de la altura del tanque 3</i> .....   | 41 |
| 3.2.2.15            | <i>Cálculo del área de secado</i> .....  | 41 |
| 3.2.3               | <b>Cálculos para el tratamiento</b> .....  | 43 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| 3.2.3.1   | <i>Principales cationes en el suelo</i> .....  | 43 |
| 3.2.3.2   | <i>Cálculo de miliequivalentes (meq-q) de los principales cationes del lodo</i> .....      | 43 |
| 3.2.3.3   | <i>Cálculo de los miliequivalentes de aluminio intercambiable (Al<sup>3+</sup>)</i> .....  | 44 |
| 3.2.3.4   | <i>Cálculo de CIC</i> .....  | 45 |
| 3.2.3.4.1 | <i>Reacciones de encalado</i> .....  | 46 |
| 3.2.3.5   | <i>Cálculo de calcio requerido basado en el aluminio intercambiable</i> .....              | 47 |
| 3.2.3.6   | <i>Cálculo de calcio requerido basado en la saturación del aluminio intercambiable</i> ... | 49 |
| 3.2.3.7   | <i>Calculo del PRNT</i> .....  | 50 |
| 3.2.3.8   | <i>Cálculo de los gramos de calcio por gramo de cal</i> .....                              | 51 |
| 3.2.3.9   | <i>Cálculo de los gramos de cal necesarios para encalar</i> .....                          | 51 |
| 3.2.3.10  | <i>Cálculo de los gramos de cal para añadir al tanque de agitación.</i> .....              | 52 |
| 3.2.4     | <b><i>Balance de masa</i></b> .....  | 52 |
| 3.2.4.1   | <i>Balance total de masa</i> .....   | 55 |
| 3.2.5     | <b><i>Dimensionamiento</i></b> .....   | 56 |
| 3.3       | <b>Proceso de producción</b> .....   | 58 |
| 3.4       | <b>Requerimientos de tecnología, equipos y maquinaria</b> .....                            | 59 |
| 3.4.1     | <b><i>Materiales y especificaciones.</i></b> .....   | 59 |
| 3.5       | <b>Análisis de costo/ beneficio del proyecto</b> .....                                     | 59 |
| 3.5.1     | <b><i>Gastos de inversión</i></b> .....  | 59 |
| 3.5.1.1   | <i>Gastos de construcción</i> .....  | 59 |
| 3.5.1.2   | <i>Gastos de instalaciones</i> .....   | 62 |
| 3.5.1.3   | <i>Gasto total de inversión</i> .....  | 62 |
| 3.5.2     | <b><i>Gastos de operación</i></b> .....  | 62 |
| 3.5.2.1   | <i>Costo de cal</i> .....  | 62 |
| 3.5.2.2   | <i>Otros costos de operación</i> .....   | 63 |
| 3.5.3     | <b><i>Gasto total</i></b> .....  | 64 |
| 3.5.4     | <b><i>Análisis financiero</i></b> .....  | 64 |
| 3.6       | <b>Resultados</b> .....  | 65 |
| 3.6.1     | <b><i>Parámetros analizados- parámetros químicos</i></b> .....                             | 66 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.6.2   | <i>Parámetros analizados- parámetros físicos</i> .....                | 66 |
| 3.6.3   | <i>Parámetros microbiológicos</i> .....                               | 67 |
| 3.7     | <b>Análisis de resultados</b> .....                                   | 68 |
| 3.7.1   | <i>Variación de los parámetros de riesgo en cada muestra.</i> .....   | 68 |
| 3.7.1.1 | <i>Variación de los parámetros de riesgo respecto al tiempo</i> ..... | 72 |
| 3.7.2   | <i>Análisis de correlación de las variables</i> .....                 | 74 |
| 3.8     | <b>Conclusiones</b> .....   | 76 |
| 3.9     | <b>Recomendaciones</b> .....  | 77 |
| 3.10    | <b>Cronograma de ejecución del proyecto</b> .....                     | 78 |

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>PT</b>             | Planta de tratamiento                                     |
| <b>PDT</b>            | Plan de desarrollo territorial                            |
| <b>JAAPARY</b>        | Junta de alcantarillado y agua potable regional Yanahurco |
| <b>PTAP</b>           | Planta de tratamiento de agua potable                     |
| <b>PTAR</b>           | Planta de tratamiento de agua residual                    |
| <b>PAC</b>            | Policloruro de aluminio                                   |
| <b>CIC</b>            | Capacidad de intercambio catiónico                        |
| <b>EA</b>             | Enfermedad de alzheimer                                   |
| <b>OMS</b>            | Organización mundial de la salud                          |
| <b>pH</b>             | Potencial de hidrógeno                                    |
| <b>EQ</b>             | Equivalente químico                                       |
| <b>EG</b>             | Eficiencia granulométrica                                 |
| <b>PRNT</b>           | Poder relativo de neutralización total                    |
| <b>CN</b>             | Condiciones normales                                      |
| <b>V<sub>TS</sub></b> | Volumen total de lodos en el sedimentador                 |
| <b>V<sub>TF</sub></b> | Volumen total de lodos en los filtros                     |
| <b>V<sub>TL</sub></b> | Volumen total de lodos                                    |
| <b>H</b>              | Altura  |
| <b>D<sub>t</sub></b>  | Diámetro de tanque  |
| <b>D<sub>a</sub></b>  | Diámetro impulsor   |
| <b>J</b>              | Ancho del deflector                                       |
| <b>E</b>              | Altura del impulsor desde la base                         |
| <b>W</b>              | Ancho de las aspas  |

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>L</b>              | Largo de las aspas                           |
| <b>r<sub>t</sub></b>  | Radio de tanque                              |
| <b>N<sub>p</sub></b>  | Numero de potencia                           |
| <b>N</b>              | Velocidad de giro                            |
| <b>ρ<sub>L</sub></b>  | Densidad del lodo                            |
| <b>g<sub>c</sub></b>  | Factor gravitacional de conversión de Newton |
| <b>μ</b>              | Viscosidad cinemática                        |
| <b>V</b>              | Velocidad de caída                           |
| <b>g</b>              | Gravedad específica                          |
| <b>N<sub>Re</sub></b> | Número de Reynolds                           |
| <b>V<sub>rs</sub></b> | Volumen real de secador                      |
| <b>meq-q</b>          | Miliequivalente químico                      |
| <b>f</b>              | Factor de corrección                         |
| <b>RAS</b>            | Relación de sodio absorbido                  |
| <b>A<sub>s</sub></b>  | Agua sobrenadante                            |
| <b>L<sub>es</sub></b> | Lodo espesado                                |
| <b>L<sub>e</sub></b>  | Lodo encalado                                |
| <b>A<sub>R</sub></b>  | Agua de regadío                              |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1-1: Porcentaje total de aluminio vs pH .....      | 11 |
| Figura 2-1: Estructura de un lecho de secado típico ..... | 22 |
| Figura 3-1: Estructura de un filtro de bandas .....       | 23 |
| Figura 4-1: Centrifuga de deshidratación .....            | 23 |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 1-3: $N_p$ vs $N_{Re}$ para diferentes agitadores.....                  | 40 |
| Gráfico 2-3: Diagrama de proceso de tratamiento de lodos.....                   | 58 |
| Gráfico 3-3: Valor de pH el primer día de encalado.....                         | 69 |
| Gráfico 4-3: Concentración de aluminio y hierro el primer día de encalado ..... | 70 |
| Gráfico 5-3: Valor de pH después de un mes de encalado .....                    | 71 |
| Gráfico 6-3: Concentración de Al y Fe después de un mes de encalado .....       | 71 |
| Gráfico 7-3: pH vs tiempo.....  | 72 |
| Gráfico 8-3: Concentración de aluminio vs tiempo.....                           | 73 |
| Gráfico 9-3: Concentración de hierro vs tiempo .....                            | 73 |

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

|  |    |
|--|----|
| Fotografía 1-1: Fosa recolectora de lodos .....                            | 3  |
| Fotografía 2-1: Descarga de lodos al sistema de desagüe.....               | 13 |
| Fotografía 3-1: Aireación de la muestra compuesta .....                    | 17 |
| Fotografía 1-3: Localización geográfica de la PTAP regional Yanahurco..... | 28 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1-1: Niveles de CIC de suelos en general .....                                      | 8  |
| Tabla 2-1: Total de muestras tomadas a la semana.....                                     | 14 |
| Tabla 3-1: Análisis post aireación .....  | 17 |
| Tabla 4-1: Equivalentes químicos y composición de distintos materiales de encalado .....  | 19 |
| Tabla 5-1: Eficiencia relativa granulométrica de la cal con base en el tipo de malla..... | 20 |
| Tabla 6-1: Muestras con su concentración de cal .....                                     | 24 |
| Tabla 1-3: Macro localización.....  | 27 |
| Tabla 2-3: Medidas de sedimentador y filtro.....  | 29 |
| Tabla 3-3: Datos para cálculos de velocidad de caída de la esfera .....                   | 38 |
| Tabla 4-3: Datos para cálculo de la densidad de una esfera.....                           | 39 |
| Tabla 5-3: Dimensiones del sistema de tratamiento .....                                   | 56 |
| Tabla 6-3: Materiales de construcción y especificaciones .....                            | 59 |
| Tabla 7-3: Costo de construcción de losas base .....                                      | 60 |
| Tabla 8-3: Costo de construcción de paredes .....   | 60 |
| Tabla 9-3: Costo de construcción de cubierta.....   | 61 |
| Tabla 10-3: Costo de accesorios y tuberías .....  | 61 |
| Tabla 11-3: Costos de instalaciones .....   | 62 |
| Tabla 12-3: Gasto total de inversión en construcción e instalaciones.....                 | 62 |
| Tabla 13-3: Costo mensual de cal .....  | 63 |
| Tabla 14-3: Otros costos de operación .....   | 63 |
| Tabla 15-3: Total de gastos de operación.....   | 63 |
| Tabla 16-3: Gasto total de implementación del tratamiento .....                           | 64 |
| Tabla 17-3: Análisis-parámetros químicos.....   | 66 |
| Tabla 18-3: Análisis- parámetros físicos .....  | 66 |
| Tabla 19-3: Análisis microbiológicos.....   | 67 |
| Tabla 20-3: Resultados del tratamiento- parámetros físicos, pH .....                      | 67 |
| Tabla 21-3: Resultados del tratamiento- parámetros químicos aluminio y hierro.....        | 68 |
| Tabla 22-3: Resultados del análisis después del encalado .....                            | 69 |
| Tabla 23-3: Resultados del análisis a un mes del encalado .....                           | 70 |
| Tabla 24-3: Resultado del análisis a seis meses del encalado (muestra 2).....             | 72 |
| Tabla 25-3: Análisis de correlativo de variables.....                                     | 75 |
| Tabla 26-3: Cronograma de ejecución del proyecto .....                                    | 78 |

## **RESUMEN**

Se realizó el diseño de un sistema de tratamiento de lodos proveniente de la planta de agua potable regional Yanahurco ubicada en el cantón Mocha en la provincia de Tungurahua. El lodo residual de la planta no posee un tratamiento adecuado y al final llega a tener contacto con terrenos de producción agrícola. Este proyecto se realizó para caracterizar los lodos y proponer un manejo adecuado a través de métodos de tratamiento como aireación y encalado, que redujeron los niveles de hierro disuelto y aluminio intercambiable presentes en el lodo, así como también se encargaron de nivelar su pH. El sistema de tratamiento cuenta con un tanque espesador, que reducirá la humedad del lodo, un tanque agitador en el que se realizará el encalado, con una aireación previa, un tanque receptor de lixiviados, que contendrá agua clarificada proveniente de los tanques mencionados y un área de secado, que contendrá el lodo encalado para su disposición final. El tratamiento se validó de acuerdo a la correlación de sus variables, como la dosificación de cal, la variación de pH, aluminio intercambiable y hierro disuelto, teniendo una alta correlación entre las tres primeras, pero baja con la variación hierro, llegando a la conclusión que el encalado fue efectivo para nivelar el pH y reducir aluminio, mas no para reducir el hierro; aspecto para el cual la aireación del lodo fue la mejor opción.

**Palabras clave:** <INGENIERÍA Y TECNOLOGIA QUÍMICA>, <TRATAMIENTO DE LODO RESIDUAL>, <ACIDEZ>, <METALES PESADOS>, <ALUMINIO INTERCAMBIABLE>, <ENCALADO (TRATAMIENTO)>.

## SUMMARY

The design of a system of sludge treatment from the regional drinking water plant Yanahurco was made. It is located in Mocha canton, Tungurahua province. The sludge of the plant does not have an adequate treatment and at the end it gets to have contact with land for agricultural production. This project was carried out to characterize the sludge and propose an adequate management through treatment methods, such as aeration and liming, which reduced the levels of dissolved iron and exchangeable aluminum, in the mud, as well as also they were in charge of balancing its pH. The treatment system has a tank thickener, which will reduce the moisture from the mud, a mixer tank to be the whitewash, with an aerator, a receiving tank of leachate, which will contain clarified water from the tanks and a drying area, which will contain the washed sludge for its final disposal. The treatment was validated according to the correlation of their variables, such as the dosage of lime, the variation of pH, exchangeable aluminum, and dissolved iron, having a high correlation between the first three, but low with the variation in iron. It concluded that the liming was effective to level the pH and reduce aluminum, but not to reduce the iron; for which the aeration of the mud was the best option.

**Keywords:** <CHEMICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY>, <TREATMENT OF RESIDUAL SLUDGE>, <ACIDITY>, <HEAVY METALS>, <EXCHANGEABLE ALUMINUM>, <LIMING (TREATMENT)>.

## CAPÍTULO I

### 1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

#### 1.1 Identificación del problema

El agua potable que es utilizada por los cantones de Cevallos, Mocha, Tisaleo y parte de Ambato en la provincia de Tungurahua es tratada en la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) regional Yanahurco ubicada en el cantón Mocha y genera dos tipos de fluidos, agua potable y los lodos como consecuencia de la potabilización del agua. (Guanoluisa, 2015)

Las medidas o normas ambientales establecidas por parte de las entidades gubernamentales u organizaciones ambientales afines, se han tornado mucho más estrictas con todas las empresas en general, y tal es el caso de la PTAP regional Yanahurco, que para regirse a las normas que exigen la obtención de la licencia ambiental se debe dar un tratamiento a los lodos generados.

El agua que se trata en esta planta proviene de fuentes originadas en el nevado Carihuairazo por lo que posee gran variedad de minerales desde la propia fuente, e incluso los lodos que se desechan al encontrarse en estado acuoso son idóneos para que exista proliferación de microorganismos. La PTAP regional Yanahurco necesita dar un tratamiento a los lodos generados; en los sedimentadores y en el agua proveniente del retro lavado de los filtros previo a la expulsión de los mismos, éste es un fluido de características variables, es decir líquido cuando está en movimiento y sólido cuando está en reposo, motivo por el cual está latente el riesgo de taponamientos en tuberías.

Los lodos también poseen una carga considerable de elementos inorgánicos; ya sea por la cantidad de arcillas, limos o arenas finas que contienen desde la propia fuente o por las sustancias químicas que se añaden para su tratamiento, como sales de aluminio, sales de hierro en diversas formas, gas cloro u floculantes, debido a la carga biológica, orgánica e inorgánica que poseen, aparte de una coloración marrón turbia que al mezclarse con suelos o riachuelos cercanos genera problemas más graves; como, en un lecho hídrico la inhibición de los procesos de fotosíntesis.

Además, según el laboratorio de análisis de la propia planta, los lodos al contener todos los elementos mencionados anteriormente, poseen una característica ácida, la planta no cuenta con un receptor adecuado de éstos residuos y generalmente al final llegan a tener contacto con terrenos

agrícolas cercanos a la zona, sin medir el riesgo que éstos pueden ocasionar a largo plazo en el sector; como el deterioro del terreno por la continua descarga de estos lodos de características ácidas, bajando el rendimiento de producción y perjudicando a los agricultores, generando con ello pérdidas económicas y terrenos con tendencia a la baja capacidad productiva.

Por ello, se debe reducir notablemente el daño ambiental a fin de evitar daños serios y pagos de multas por infringir normas ambientales a las que se puede dar una solución.

## **1.2 Justificación del proyecto**

La elaboración del presente proyecto generará un marco de amplia información al indicar aspectos significativos y positivos de interés científico referentes a la disposición de los residuos, no solo de la PTAP regional Yanahurco, sino de plantas de tratamiento de agua potable en general; involucrando temas de contaminación ambiental como lodos ácidos con una carga de metales pesados que tomen en cuenta las soluciones más adecuadas. Ello permitirá valorar sistemas de tratamiento de otras áreas, considerados no apropiados en el área tratamiento de desechos sólidos y biosólidos, y a su vez, validará su aplicación; retomando su importancia con una explicación convincente, coherente y respaldada bibliografía confiable. Temas que son de vital importancia en la actualidad en donde la investigación referente a la contaminación ambiental y la optimización de recursos como el agua, avanzan día a día.

Además está presente el apoyo de la Junta Parroquial de Yanahurco y el Municipio del cantón Mocha entidades comprometidas con el bienestar ambiental, que están dispuestos a destinar espacios, mano de obra y financiamiento para que este proyecto se convierta en una realidad, razón por la cual su implementación resulta viable en todo sentido.

Por lo tanto con el presente proyecto se espera contribuir de cierta manera a un estudio más profundo de todos los aspectos mencionados y buscar así el beneficio tanto para el ambiente, para el ser humano y en este caso para la PTAP regional Yanahurco.

## **1.3 Línea de base del proyecto**

### ***1.3.1 Fuentes de agua***

La PTAP regional Yanahurco trata el agua proveniente del nevado Carihuairazo, y tiene la capacidad de generar 45 L/s de agua potable que abastecen los cantones de Cevallos, Tisaleo, Mocha y Ambato. Éste último posee otras fuentes de abastecimiento debido a que es el catón con mayor cantidad de habitantes de la Provincia. (Guanoluisa, 2015)

### ***1.3.2 Reconocimiento del lugar de investigación***

Inicialmente se procedió al reconocimiento de la PTAP regional Yanahurco como parte de un diagnóstico del área involucrada en el proyecto. Se verificó que los lodos son producidos por la sedimentación del floc generados en el tratamiento del agua cruda y del lavado de los filtros que retiran dichos sedimentos del agua potable distribuida a la red.

Estos lodos son retirados normalmente una vez por día, dependiendo de los sólidos presentes en el agua cruda que la planta recibe, dicha descarga de lodos se realiza a un desagüe de la planta designada exclusivamente para descarga de lodos. Estos lodos al salir de las tuberías de la planta son encausados en un pequeño canal abierto que se dirige a un pozo receptor a nivel del suelo que se pierde en la vegetación de la zona, ubicado a 500 metros aproximadamente de la planta de tratamiento que origina tales lodos (Ilustración 1-1). Este tanque no consta con un diseño técnico ni planificado, que pueda ayudar a que estos lodos sean tratados y por ende aprovechados de alguna forma.

Cabe mencionar que al realizar el tratamiento del agua en la PTAP regional Yanahurco, se utilizan agentes floculantes y coagulantes elaborados a base de polímeros de aluminio y hierro, razones por las que se presume la presencia de metales pesados en los lodos producidos, situación que requiere un tratamiento para evitar inconvenientes con las legislaciones ambientales competentes.



**Fotografía 1-1:** Fosa recolectora de lodos  
Realizado por: Washington Arostegui, 2016

### ***1.3.3 Tipo de estudio***

El tipo de estudio en el que se basa el presente proyecto de titulación es un estudio técnico, que abarca aspectos de orden analítico descriptivo, es decir propone la utilización de recursos

tecnológicos para el tratamiento de lodos y explica dicho fenómeno basado en la medición de variables del proceso de tratamiento como la carga de minerales y su pH, y se analiza cómo éstas se deben tratar de mejor manera para buscar una solución óptima a la problemática planteada.

### ***1.3.4 Métodos***

El Instrumento principal para llegar a tener una solución a la problemática del proyecto depende en gran medida de los métodos aplicados para tal fin, sin el empleo de la metodología adecuada es imposible obtener resultados confiables que sean la base de nuevas investigaciones futuras y el desarrollo del conocimiento en sí. (Gómez, 2012)

Por lo tanto los métodos en los cuales se basa el proyecto para su elaboración son el inductivo y analítico, englobando un estudio centrado en la problemática ambiental generada por el derrame de lodos para llegar a una solución óptima y eficiente.

#### ***1.3.4.1 Método inductivo***

En el caso de los lodos la aplicación de una proyección es vital, al conocer la naturaleza de los mismos como lugar de origen o tipo de tratamiento, podemos conocer posibles parámetros fuera de norma, como presencia de aluminio y hierro, pH ácido, lugar en donde dichos parámetros se pudieron alterar, posibles soluciones etc. Es decir se traslada de lo específico hasta lo más general con la finalidad de reducir tiempo en la búsqueda de soluciones rápidas para temas de resolución lógica.

Con este método podemos proyectar una idea específica hacia posibles campos similares en los que puede tener efecto dicha idea. (Scarano, 2004)

#### ***1.3.4.2 Método analítico***

Es importantísimo su empleo en el análisis de los resultados, pretratamiento y postratamiento, ya que con tales cifras validamos la eficiencia en parámetros estadísticos del tratamiento de encalado al lodo de la PTAP regional Yanahurco.

Al ser un método minucioso y directo, se centra en el desglose de todos los aspectos que conforman un todo para buscar su relación causa efecto. (Gómez, 2012)

### ***1.3.5 Técnicas de investigación***

El proyecto realiza una combinación de investigaciones documental y de campo, tanto para una como para otra se establece técnicas específicas.

#### ***1.3.5.1 Investigación documental***

Su aplicación para el diseño del sistema de tratamiento de lodos se basa en la revisión de procedimientos de laboratorio, como los métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, STANDARD METHODS 21° EDICIÓN y los métodos Hach adaptados del Standard Methods 21° edición, son indispensables para una caracterización completa del lodo. Además se toma como referencia la norma oficial mexicana 004 emitida en el año 2002, referente a sólidos y biosólidos.

#### ***1.3.5.2 Investigación de campo***

La técnica aplicada en este tipo de investigación es la entrevista, directamente con el profesional y operadores a cargo de la planta, y con los moradores aledaños a la misma, con los que se establece los requerimientos, necesidades y probabilidades de una solución efectiva.

Además de una observación directa del fluido a tratar, su generación en la planta, coloración, viscosidad y disposición previa al tratamiento a implementar.

### ***1.3.6 Aspectos generales de la planta de agua potable regional Yanahurco***

#### ***1.3.6.1 Descripción de la planta***

La planta cuenta con un sistema de tratamiento compuesto por una serie de operaciones unitarias ordenadas con el único objetivo de la obtención de agua potable.

##### **✓ Primera Filtración**

Realizada en la entrada del agua cruda a la planta de tratamiento, por tres filtros de grava y arena con un área aproximada de 50 m<sup>2</sup> cada uno, el agua una vez filtrada en ésta etapa se dirige a cisternas para ser aireadas.

##### **✓ Aireación**

Proceso realizado a través de dos aireadores de bandejas localizados antes del ingreso a los tanques floculadores. Ésta etapa junto con la filtración representa el 15% del proceso.

✓ Floculación

En ésta etapa se adiciona policloruro de aluminio con el 30% de pureza como agente floculante en dos tanques floculadores de 18 m<sup>3</sup> de volumen cada uno, para la formación del floc, y su sedimentación que posteriormente generará los lodos. La floculación representa el 50% del proceso de potabilización.

✓ Sedimentación

Cuenta con dos tanques sedimentadores de 67.23 m<sup>3</sup> cada uno, en los cuáles el agua con floc es sedimentada formando barro que se acumulan en la parte inferior de los sedimentadores formando una capa de máximo de 0.5 m de espesor, que posteriormente formaran parte del total de lodos liberados como residuo de la planta. La sedimentación representa el 15% del proceso de Potabilización.

✓ Segunda Filtración

El agua tratada se procede a filtrar con el objetivo que la cantidad de sólidos presentes en el agua para consumo humano cumpla con estándares de calidad establecidos. Ésta etapa genera también lodos en el interior de dos tanques contenedores de lodos de filtrado, con un volumen de 40.5 m<sup>3</sup> cada uno, los lodos generados en ésta etapa se acumulan en la parte inferior de los tanques con un espesor máximo de 0.25m. La filtración de los sólidos abarca el 15% del proceso total de potabilización.

✓ Cloración

Para realizar la desinfección microbiana, la planta inyecta gas cloro licuado o una solución de hipoclorito previamente mezclada en tanques y transportada por una bomba, controlando su dosificación. Ésta etapa representa el 5% del proceso total de potabilización de agua.

Todos estos procesos son adecuados para tratar un caudal de 45 l/s que es la capacidad máxima de la planta, desde un abastecimiento de agua entubada que llega proveniente de los deshielos del nevado Carihuairazo.

### *1.3.6.2 Descripción de la zona*

El sector es una zona montañosa, netamente agrícola con clima frío, con temperaturas que oscilan entre 10°C y 15°C. A los alrededores de la PTAP están establecidas pequeñas áreas residenciales dispersas como haciendas, quintas, o simples terrenos cultivados por gente nativa del sector; mismos que cuentan con una vía principal que conecta todos estos sectores con la cabecera cantonal de Mocha, permitiendo la comunicación y el comercio.

La planta de agua potable regional Yanahurco abastece completamente a los cantones de Cevallos, Mocha, Tisaleo y una parte del cantón Ambato, todos en la provincia de Tungurahua.

#### *1.3.6.3 Formación de los lodos*

Los lodos que la planta desecha son producto de la sedimentación de los sólidos presentes en el agua que ingresa para ser tratada en la planta, añadido previamente poli cloruro de aluminio con una pureza del 30%, un floculante que permitirá que estos solidos se adhieran entre sí, aumentando su tamaño de partícula y velocidad de caída por gravedad en los tanques sedimentadores.

Ésta agua clarificada atraviesa filtros que retienen sólidos que por el movimiento del agua se encuentran en la parte superficial, quedando un remanente en estos filtros que posteriormente serán lavados; generando más residuos que pasarán a formar parte de los lodos que la planta al final origina.

#### *1.3.6.4 Lodo de la PTAP regional Yanahurco y su relación con el suelo en general*

Se habla de suelo y sus características como: la acidez, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el porcentaje de los cationes presentes en éste, etc., debido a que el lodo de la PTAP regional Yanahurco que se espera tratar es un tipo de suelo con gran humedad.

Esto debido a que, la fuente de agua potable es mineral y en su recorrido acarrea todo tipo de material presente en el suelo por el que recorre, llegando de esta manera en el tratamiento de agua potable a sedimentar, y obtener todo este contenido como un lodo o suelo muy húmedo. Es importante mencionar esto, ya que este lodo es muy diferente a un lodo de aguas residuales que posee otra naturaleza con sedimentos de industrias y hogares y muy pocos de origen mineral. (Ramalho, 1991)

Al ser considerado como una forma de suelo se espera que dicho lodo tenga las características propias de un suelo, considerando obviamente la gran diferencia de humedad entre uno y otro.

#### *1.3.6.5 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)*

Es un factor que nos permite saber la capacidad del lodo de intercambiar cationes, a fin de evitar su saturación por bases con algún reactivo o fertilizante. Determina el tipo de suelo más adecuado para que distintos cultivos se desarrollen sin problema.

La CIC basa su cálculo en los cationes que se encuentran en mayor proporción en el suelo y sus unidades son mili equivalentes (meq-q) o centi moles por cada 100 gramos de suelo o lodo (cmol/100 g)

**Tabla 1-1:** Niveles de CIC de suelos en general

| <b>C.I.C total (meq/100g)</b> | <b>Nivel</b> | <b>Observaciones</b>   |
|-------------------------------|--------------|--|
| 0-10                          | Muy bajo     | Suelo muy pobre, necesita aporte importante de materia orgánica para elevar el CIC |
| 10-20                         | Bajo         | Suelo pobre, necesita aporte de materia orgánica                                   |
| 20-35                         | Medio        | Suelo medio  |
| 35-45                         | Medio alto   | Suelo rico   |
| Mayor de 45                   | Alto         | Suelo muy rico   |

**Fuente:** (Garrido, 1994)

**Realizado por:** Washington Arosteguí, 2017

#### 1.3.6.6 *Acidez del suelo*

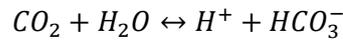
Una sustancia es ácida porque tiende a entregar protones, es decir iones hidrógeno ( $H^+$ ), este concepto se aplica para todo tipo de soluciones ácidas. El proceso contrario se denomina basicidad o entrega de iones Hidroxilos ( $OH^-$ ). Un suelo neutro tiene saturado el proceso de intercambio de minerales básicos como calcio, magnesio, potasio, etc. (Molina, 1998)

#### 1.3.6.7 *Causas de la acidez del suelo/lodo*

La acidificación inicia por la propia presencia de flora en un terreno, exactamente cuando las raíces de las plantas en el suelo empiezan un proceso de intercambio, absorbiendo los nutrientes (cationes básicos) y liberando iones ( $H^+$ ) que posee dentro de su estructura con el fin de crear un equilibrio en sí. (Molina, 1998)

De igual forma la acidificación se puede formar por lixiviación, esto cuando los cationes mencionados anteriormente forman pares aniónicos con aniones presentes en el suelo, siendo éstos arrastrados por la humedad hacia capas inferiores reduciendo estos cationes básicos en la superficie y aumentando de igual forma la acidez.

Además existe la descomposición de materia orgánica presente en la superficie que genera  $CO_2$ , y éste al tener contacto con el agua fácilmente se convierte en bicarbonato de acuerdo a la siguiente reacción:



Esta reacción genera  $H^+$ , que eleva el pH y el  $HCO_3^-$ , reacciona con más cationes básicos, provocando así aún más la lixiviación de pares aniónicos.

En las PTAP generalmente por la adición de coagulantes o floculantes en el tratamiento se llega a aumentar la acidez del agua cruda, pero al sedimentarse y generar el agua potable que está regida a la norma INEN 1 108, esta acidez pasa a formar parte del lodo de desecho final, en la que no se toma en cuenta normativa alguna en nuestro país.

#### *1.3.6.8 Exceso de hierro en el lodo*

El hierro no es tóxico para las plantas en suelos aireados, pero puede contribuir a la acidificación del suelo, y a la disminución del fósforo y el molibdeno, elementos esenciales para las plantas. (Mujeriego, 1990)

Los lodos de la PTAP regional Yanahurco poseen una exagerada cantidad de Hierro, que es uno de los micro elementos presentes en un agua residual común o el agua de desecho, siendo entonces dichos lodos no apta para el contacto con los suelos.

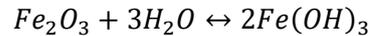
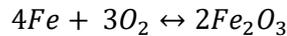
#### *1.3.6.9 Remoción de hierro*

Se lo realiza por un proceso de aireación con equipos aspersores que expulsan el lodo hacia un tanque en donde se le dará un posterior tratamiento.

Este método se caracteriza por mezclar el lodo de una viscosidad mayor que el agua convertido en partículas más pequeñas con un medio gaseoso, que en este caso es el aire del ambiente, los iones de hierro presentes en el lodo recogerán las moléculas de oxígeno presente en el aire y reaccionará con éste, formando un compuesto insoluble. (Lenntech, 2009)

La aireación se la puede realizar con un proceso inverso al explicado anteriormente, es decir a través de la inyección de moléculas de oxígeno al lodo en tratamiento, a través de burbujas de aire con un compresor de aire, durante un tiempo prolongado.

Los dos métodos mencionados tienen como objetivo la reacción del hierro disuelto ( $Fe^{2+}$ ) con el oxígeno del aire ( $O_2$ ), generando su forma oxidada ( $Fe^{3+}$ ) en compuestos como el Hidróxido Férrico  $Fe(OH)_3$ , o el óxido férrico  $Fe_2O_3$  principalmente.



#### *1.3.6.10 Exceso de aluminio en el lodo*

La baja productividad de suelos agrícolas a causa del aluminio, radica en que al ser un catión, compite con los demás cationes (calcio, magnesio, potasio y sodio) que son minerales que tienen efectos positivos para la planta ayudando a su crecimiento; y el aluminio al momento de ser absorbido por las plantas afecta la división celular en el ápice de la raíz, aumenta la rigidez de las membranas celulares, reduce la replicación del ADN, interfiere en los procesos donde interviene ATP, interfiere con la absorción y transporte de los nutrientes. (Espinoza & Molina, 1999)

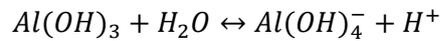
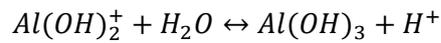
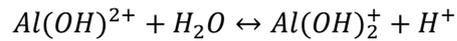
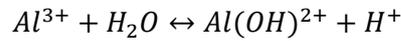
El indicio más notorio de toxicidad por aluminio es el limitado desarrollo radicular, con raíces demasiado cortas y deformes, y la posterior consecuencia es la menor absorción de nutrientes y agua. Los niveles de aluminio permitido en suelos como máximo están en un rango de 5 a 20 mg/kg o mg/l. (Mujeriego, 1990)

En cuanto se refiere al ser humano, existe mucha información que indica que éste es uno de los principales factores para la aparición de la enfermedad alzheimer (EA). Como lo indica el estudio realizado por el doctor Héctor E. Solórzano del Río en el año 2004, el cual basa su estudio en la revista médica británica Lancet, con un análisis del hipocampo o centro de la memoria de personas fallecidas con esta enfermedad, mismo que se encontraba recubierto por fibras nerviosas enredadas que impedía la entrada y salida de información, además de encontrar restos de aluminio y sílice en esta región del cerebro en las autopsias que los médicos realizaban.

De igual forma el artículo publicado por el centro colaborador de la OMS (Organización Mundial de la Salud) para el desarrollo de la investigación en enfermería, de Brasil, con sede en la Universidad de Sao Paulo a cargo de la doctora Susana Inés Segura Muñoz, indica que de los resultados de su investigación “El 68% de las pruebas presentan al aluminio como uno de los factores de riesgo para la EA, comprobando y describiendo los mecanismos toxicológicos a través de los cuales el aluminio afecta al tejido nervioso”.

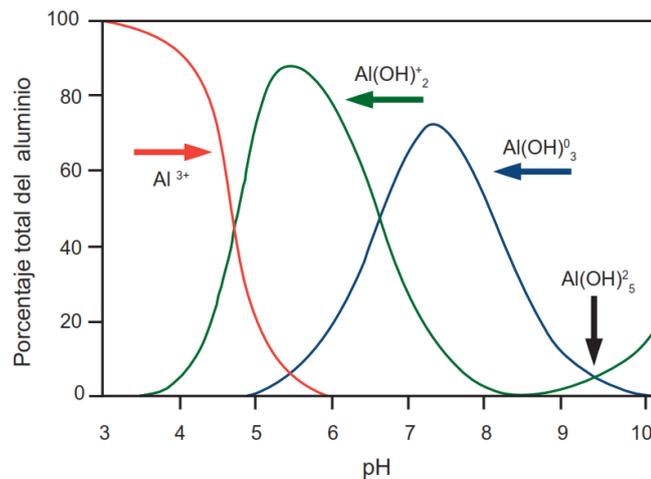
### 1.3.6.11 Hidrólisis del aluminio

El aluminio en suelos ácidos es el catión predominante, éste tiene la capacidad de hidrolizarse, generando  $H^+$ , como lo indican las siguientes reacciones:



La existencia de estos compuestos dependerá del pH, por lo tanto en un  $pH < 5$  el  $Al^{3+}$  es la forma predominante, el  $Al(OH)^{2+}$  y el  $Al(OH)_2^+$  existen en mayor proporción en un pH comprendido entre 5-6. Mientras que el  $Al(OH)_4^-$ , puede existir en suelos con  $pH > 8$ , en donde no es un suelo ácido, es más tiende a ser básico, siendo éste donde empieza teóricamente el proceso de acidificación.

La hidrólisis de aluminio se cumple de igual forma en los lodos de la PTAP regional Yanahurco por el hecho de ser un medio acuoso y añadir policloruro de aluminio en su potabilización.



**Figura 1-1:** Porcentaje total de aluminio vs pH  
Fuente: (Espinosa & Molina, 1999)

La figura 1-1 muestra el comportamiento de las distintas formas del aluminio en su proceso de hidrólisis, el  $Al^{3+}$  disminuye notablemente entre el pH 5 y 6, esta forma de aluminio indica que mientras mayor es su cantidad, un pH más bajo tendrá el suelo por ser la forma que ha liberado todos sus  $H^+$ .

#### *1.3.6.12 Aluminio intercambiable*

El aluminio puede provocar una falta de productividad en suelos ácidos, aunque en suelos alcalinos se precipitará el ion y se eliminará su toxicidad. (Mujeriego, 1990).

Se refiere como aluminio intercambiable a todo el aluminio presente en un lodo o suelo que se encuentra unido a éste por sus fuerzas electrostáticas y mas no por enlaces de tipo covalentes más fuertes. Lo cual refiere que este tipo de aluminio puede intercambiarse a través una reacción de sustitución o desplazamiento con la adición de un reactivo adecuado.

El aluminio intercambiable es el que reacciona en un tratamiento de lodos a fin de bajar su nivel de alta toxicidad.

#### *1.3.6.13 Problemas por acidez*

Los lodos de la PTAP regional Yanahurco de tener contacto con un suelo pueden generar inconvenientes a largo plazo. La acidez indica un problema que va más allá de tener un pH bajo que disminuya la productividad de un suelo, generalmente la acidez es un factor que indica la presencia de otros cationes que en exceso son tóxicos para las plantas y el ser humano en si, como lo es el aluminio, también otros que son causantes de esa acidez como lo es el hierro y que en conjunto son una amenaza real para un terreno agrícola.

### ***1.3.7 Muestreo de los lodos***

La descarga de los lodos se efectúa en la planta normalmente una vez por día a un pozo con forma de trapecio invertido, con una profundidad de 1.5 metros, situado a 500 metros aproximadamente de la planta. El lodo en su recorrido está expuesto a tener contacto con aguas lluvias, basuras, materia orgánica de animales de la zona, etc., que pueden alterar la composición que poseen al ser evacuados de la planta, razón por la cual se muestreó en el punto de salida de los lodos de la PT regional Yanahurco.



**Fotografía 2-1:** Descarga de lodos al sistema de desagüe

**Realizado por:** Washington Arostegui, 2016

#### 1.3.7.1 *Métodos de muestreo*

La representatividad de una muestra es fundamental ya que ella actúa como un sustituto y se convierte en la fuente básica de información sobre la cual se basan todos los subsecuentes análisis e interpretaciones. (Satti, 2015)

Los métodos de muestreo aplicables son el simple y compuesto. El muestreo de los lodos se establece en tres días, lunes, miércoles y viernes, con el fin de tener una muestra final compuesta distribuida equitativamente durante la semana laborable, es decir cada día se tomará la muestra de lodo acumulado desde el día anterior, se estima que la concentración no varíe en gran medida ya que los floculantes y coagulantes tampoco han variado en su dosificación, y al realizar controles rutinarios del agua que ingresa a la planta, se tiene controlado también sus componentes, con ello evitamos en gran medida tener valores de resultados atípicos en los análisis de las muestras. (Barreto, 2009)

Se toman dos muestras diarias; una para el análisis del día respectivo y otra para formar una muestra compuesta para un análisis en conjunto final. (NOM.004 SEMARNAT, 2002).

Las muestras se toman en las mañanas entre las 6:00 h y 7:00 h debido a que no se puede retener por largo tiempo los lodos, ya que los sedimentos pueden sobrepasar el límite de los sedimentadores destinado a lodos que es de 0.5 m de altura y de los filtros que es de 0.25 m de

altura y contaminar el agua potable que se genera. Al no existir un tanque de recolección adecuado, los lodos se acumulan en los sedimentares y filtros para una descarga completa en el momento del muestreo.

**Tabla 2-1:** Total de muestras tomadas a la semana

| <b>Días de muestreo</b> | <b>Número de muestras</b> | <b>Tipo de muestra</b> | <b>Número de muestras</b> | <b>Tipo de muestra</b> |
|-------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|
| Lunes (día 1)           | 1                         | Simple                 | 1                         | Simple                 |
| Miércoles (día 2)       | 1                         | Simple                 | 1                         | Simple                 |
| Viernes (día 3)         | 1                         | Simple                 | 1                         | Simple                 |
| Muestras de análisis    | 3                         | Simples                | 1                         | Compuesta              |

Realizado por Washington Arosteguí, 2017

Las muestras simples de la tabla anterior formaran la muestra compuesta; entonces las muestras a analizar serían 4 en total.

### **1.3.8 Análisis de las muestras**

#### **1.3.8.1 Parámetros a analizar**

Los análisis realizados se guían en la norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002.- PROTECCIÓN AMBIENTAL- LODOS Y BIOSÓLIDOS-), en el apartado 4.6-Tabla 1.-*Límites máximos permisibles de metales pesados en biosólidos* (ver anexo F); se clasifica a los lodos como excelentes o buenos para su aprovechamiento de acuerdo a las cantidades de metales pesados que pueden contener un lodo o biosólido sin especificar las características del mismo o su procedencia.

Además en dicho apartado se muestra la tabla 2.- *Límites permisibles para patógenos y parásitos en lodos* (ver anexo G), de la misma norma en mención, ésta no es la más apropiada para las características de los lodos que genera la PT regional Yanahurco, puesto que ésta realiza un tratamiento de agua cruda para generar agua potable, mas no lodos de un tratamiento de aguas residuales, que se adaptan a los parámetros que dicha tabla me indica.

En estos lodos existe la presencia de sales de aluminio y sales de hierro, que le dan una característica ácida a este fluido (Cerón, 2016)

Para lo cual es necesario añadir éstos dos parámetros a nuestros análisis de laboratorio, además de parámetros físicos como son pH, conductividad, sólidos suspendidos, materia orgánica, densidad y humedad; que son parámetros que se pueden ver afectados por su presencia.

### ***1.3.9 Pruebas de tratabilidad***

Las pruebas de tratabilidad de lodos indican todas las formas posibles que se puede utilizar a fin de estabilizar un lodo que de cierta manera significa un riesgo su contacto con el ambiente. Dependiendo el tipo de lodo se pueden utilizar métodos como procesos de compostaje, ataque con bacterias anaerobias, deshidratación de lodos entre otras. Un tratamiento típico de lodos de una PTAP convencional considera normalmente cuatro etapas: recolección, espesamiento, tratamiento y disposición final; de las cuales la tercera etapa corresponde al tratamiento propio, el cual puede ser una deshidratación o procesos de compost.

#### ***1.3.9.1 Recolección***

Una vez expulsados los lodos de la PTAP regional Yanahurco, se recolectan en un tanque diseñado exclusivamente para darle un tratamiento a dichos lodos, los diseños dependerán de la cantidad de lodos producidos y de la capacidad que tenga la planta para manejar la mencionada cantidad.

#### ***1.3.9.2 Espesamiento***

Los lodos expulsados de una PTAP convencional poseen un gran contenido de agua, generalmente por el retro lavado de los filtros en el que se emplea agua de la línea de circulación de la planta que llega a mezclarse con los lodos producidos en la sedimentación. Para facilitar la etapa de tratamiento es necesario que esta mezcla se separe en dos fases, lodo y agua, a través de un espesamiento, generalmente por gravedad. Con este paso la reducción de líquido y cantidad de lodo es más manejable para una deshidratación óptima en próximas etapas.

#### ***1.3.9.3 Tratamiento***

El tratamiento es la parte más importante de todas las fases vistas anteriormente, puesto que esta etapa definirá lo que se realizara con los lodos en su disposición final. Los lodos producidos en la PTAP regional Yanahurco no son aptos para realizar procesos de remediación ambiental como compost, que generalmente se realizan con lodos de carga biológica alta en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR); por lo que la deshidratación es la opción más viable.

El objetivo de un proceso de deshidratación es la reducción máxima posible de agua contenida dentro de otra sustancia, tomando en cuenta este criterio se llega a la idea que cualquier tipo de secado es un proceso de deshidratación con lo cual podemos llegar a ver dos tipos de deshidratación; la deshidratación mecánica y la deshidratación natural. (Ramírez, 2008)

#### *1.3.9.4 Disposición final*

Una vez se haya deshidratado los lodos conforme al proceso realizado podemos decir que éstos no representan peligro alguno para el ambiente. Con ello los lodos de estas características sin riesgo pueden ser utilizados de acuerdo a la sustancia añadida previo a la deshidratación, si es cal se puede utilizar los iones calcio generados como reacción para suelos escasos de este mineral. También se puede utilizar como material base para la elaboración de ladrillos refractarios o cerámicas de construcción.

#### *1.3.10 Otras pruebas de tratabilidad*

Es necesario que para eliminar ciertas impurezas de difícil remoción se apliquen procesos específicos para cada sustancia o parámetro que se encuentre con un valor atípico. Procesos como la aireación, encalado o adición de un coagulante han tenido mucho éxito en tratamientos convencionales de aguas residuales, claramente dependiendo la sustancia que se quiera hacer reaccionar.

Por ello se debe identificar en el lodo a tratar las sustancias que poseen valores que no estén dentro de norma y aplicar un tratamiento específico con el proceso más idóneo posible, puesto que éste puede servir no solo en el tratamiento de una contaminante, sino de varios; optimizando procesos, costos y tiempo.

##### *1.3.10.1 Aireación*

La aireación es un proceso muy utilizado en tratamiento de aguas residuales con la finalidad de eliminar gases volátiles disueltos y sustancias inorgánicas no deseadas; en base a la oxigenación del agua en tratamiento. Dentro de las sustancias inorgánicas en este tipo de aguas tenemos el manganeso y el hierro, este último especialmente es el motivo por el que se toma en cuenta la aireación como una solución en el tratamiento de lodos. Son estas razones para el uso de una aireación como método de disminución de hierro.



**Fotografía 3-1:** Aireación de la muestra compuesta  
**Realizado por:** Washington Arosteguí, 2017

La aireación se lo realizó través de la inyección de moléculas de oxígeno al lodo, a través de burbujas de aire con un pequeño compresor de aire empleado en peceras, durante tres días, posteriores a los cuales se realizó un análisis de la muestra, obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 3-1:** Análisis post aireación

| Muestra   | pH   | Aluminio (mg/kg) | Hierro (mg/kg) |
|-----------|------|------------------|----------------|
| Compuesta | 5.70 | 40.87            | 43.69          |

**Fuente:** (Laboratorio de Aguas residuales ESPOCH)  
**Realizado por:** Washington Arosteguí, 2017

Notoriamente se reduce la cantidad de hierro de 84.66 mg/kg hasta casi la mitad de dicho valor, cambio que no se observa en el aluminio, ni tampoco en el pH, por lo que es necesario considerar otro tratamiento que se encargue de éstos dos parámetros.

#### 1.3.10.2 Encalado

El encalado es un tratamiento aplicado en suelos, aguas residuales y en diversos procesos industriales, que consiste en la adición de cal o sustancias básicas semejantes que plantean como objetivo la disminución de la acidez de la sustancia en tratamiento. Para que se realice el encalado es necesario la presencia de agua, éste será el medio de reacción, generalmente existe aunque sea una parte mínima en cualquier suelo. A menor cantidad de agua menor será la velocidad de reacción.

Para encalar el lodo de la PTAP regional Yanahurco, se establece un cálculo basado en la concentración de bases o nutrientes del lodo (suelo), valor a partir del cual se basan las distintas

concentraciones de cal añadidas, justificando una mejor dosificación calcárea y evitar un sobre encalado del lodo. (Espinoza y Molina, 1999)

El objetivo primordial de éste cálculo es el de plantear una base conceptual y coherente para un encalado exclusivo y propio de lodos; y no tener que empezar un tratamiento sin el conocimiento del porqué de la adición de cierta cantidad de cal, como en una prueba de jarras. A mayor cantidad variaciones de concentración, mayor es la precisión del valor de la cantidad de cal necesaria para un tratamiento efectivo.

Con el conocimiento de este valor se constituye como mínimo 5 a 6 muestras de las cuales una se le añadirá previamente disuelto el valor calculado de cal, y las demás serán variaciones proporcionales de la misma (doble, triple, cuádruple, etc. Del valor calculado).

### *1.3.10.3 Requerimientos de cal*

#### *1.3.10.3.1 Cal*

Es la principal sustancia de coloración blanquecina utilizada como reactivo en el encalado. Como principales materiales de encalado se encuentran el óxido de calcio, hidróxido de calcio, cal agrícola o calcita, dolomita, óxido de magnesio, magnesita, o arcillas calcáreas.

#### ✓ Óxido de calcio

La cal viva u óxido de calcio (CaO) es un polvo blanco de muy difícil manejo, formada por la calcinación de piedra caliza. Posee la ventaja de que al ser un óxido reacciona rápidamente con la sustancia en contacto, generando iones OH<sup>-</sup> que reaccionaran con los iones H<sup>+</sup> presentes en la sustancia reduciendo así la acidez de la misma. En su forma pura posee 71% de calcio.

El óxido de calcio puro puede generar inconvenientes en su manejo, al ponerse en contacto con agua bruscamente genera una reacción exotérmica, por lo que su manejo debe realizarse con protección adecuada.

#### ✓ Hidróxido de calcio

La cal hidratada o hidróxido de calcio [Ca (OH)<sub>2</sub>], se forma por la hidratación del óxido de calcio, es una sustancia polvorienta de difícil manejo muy semejante al óxido de calcio en cuanto a su rápida velocidad de reacción. Posee un 56% de calcio en su forma pura lo que le hace una sustancia menos efectiva para encalado que el óxido de calcio, pero más eficiente que el carbonato de calcio. Las dos primeras deben ser mezcladas rápidamente a fin de evitar que se formen residuos sólidos de cal que impidan su correcta reacción.

✓ Cal agrícola o calcita

Por su precio y manejo es la sustancia más utilizada en el encalado de suelos ( $\text{CaCO}_3$ ), producida no solo por caliza, sino también por roca calcárea, misma que posee impurezas que reducen su porcentaje de calcio a un 40%.

✓ Óxido de magnesio

El óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) es una sustancia que posee una cantidad de Mg de 60%, lo que le da una capacidad mayor de neutralizar la acidez en general, es apta para encalado en suelos donde exista carencia de magnesio. La desventaja de ésta es que posee una baja solubilidad en agua.

#### 1.3.10.4 Pureza de la cal

La pureza de un compuesto químico influye en la efectividad de la reacción, cuan eficiente es una reacción u otra dependerá del porcentaje de pureza del mismo. En el encalado esta regla se aplica estrictamente, ya que la acidez debe ser controlada sin producir un efecto alcalino en la sustancia. El porcentaje de calcio o magnesio de la cal ayuda a conocer su capacidad de encalado en el lodo.

Es cuando aparece el criterio de equivalente químico (EQ), que es el poder de neutralización de la cal comparado con el  $\text{CaCO}_3$  que químicamente puro posee un valor del 100%. En la siguiente tabla se muestran los valores de distintos EQ de cales utilizadas para encalado.

**Tabla 4-1:** Equivalentes químicos y composición de distintos materiales de encalado

| Material              | Equivalente Químico (EQ) | Fórmula Química                     | Contenido de Ca (%) | Contenido de Mg (%) |
|-----------------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Carbonato de Calcio   | 100                      | $\text{CaCO}_3$                     | 40                  | -                   |
| Dolomita              | 108                      | $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ | 21.6                | 13.1                |
| Óxido de Calcio       | 179                      | $\text{CaO}$                        | 71                  | -                   |
| Hidróxido de Calcio   | 138                      | $\text{Ca(OH)}_2$                   | 54                  | -                   |
| Hidróxido de Magnesio | 172                      | $\text{Mg(OH)}_2$                   | -                   | 41                  |
| Carbonato de Magnesio | 119                      | $\text{MgCO}_3$                     | -                   | 28.5                |
| Óxido de Magnesio     | 248                      | $\text{MgO}$                        | -                   | 60                  |
| Silicato de Calcio    | 86                       | $\text{CaSiO}_3$                    | 34.4                | -                   |
| Silicato de Magnesio  | 100                      | $\text{MgSiO}_3$                    | -                   | 24                  |

Fuente: (J. Espinosa y E. Molina, 1999)

Realizado por: Washington Arosteguí, 2017

### 1.3.10.5 Tamaño de las partículas de cal

La fineza de las partículas o eficiencia granulométrica (EG) influye en gran medida en la velocidad de reacción de la cal, mientras más finas son sus partículas, mayor es el área de contacto de la cal y mientras mayor es la superficie específica, más rápido reacciona la cal con el suelo. (Espinosa y Molina, 1999)

De acuerdo al tamaño de la partícula se establece la EG de un material:

**Tabla 5-1:** Eficiencia relativa granulométrica de la cal con base en el tipo de malla

| Número de malla Mesh* | Tamaño de los orificios (mm) | Eficiencia relativa (%) |
|-----------------------|------------------------------|-------------------------|
| < 8                   | >2.36                        | 0                       |
| 8-20                  | 2.36-0.85                    | 20                      |
| 20-40                 | 0.85-0.42                    | 40                      |
| 20-60                 | 0.85-0.25                    | 60                      |
| >60                   | <0.25                        | 100                     |

\*Número de orificios por pulgada Cuadrada

Fuente: (J. Espinosa y E. Molina, 1999)

Realizado por: Washington Arostegui, 2017

La cal a emplear posee un número de malla de 42, entonces su eficiencia relativa está dentro de 20-60 con el 60% de eficiencia Relativa. Estos datos sirven para ver qué tipo de cal es la más conveniente económicamente hablando.

### 1.3.10.6 Poder relativo de neutralización total (PRNT)

El poder relativo de neutralización es un factor que nos permite relacionar de manera más íntima, la fineza y la pureza química de un material para encalado. Este parámetro se obtiene multiplicando el EQ del material de encalado por su EG, y dividiéndolo para 100.

El PRNT indica que cantidad de cal expresada por su equivalente químico es capaz de reaccionar en un periodo de tiempo de 6 meses (Espinosa y Molina, 1999), llegando a obtener el real valor de neutralización de una cal.

### 1.3.10.7 Encalado de lodos

El Encalado es un proceso en el cual se utiliza un material, sustancia o reactivo, que se denomina material de encalado (generalmente cal), añadiéndolo a otra sustancia de características ácidas,

misma que presenta pH bajo, además de otras características que requieren tratamiento. El hecho de que la cal se haya utilizado desde antes que los métodos modernos se establecieran en tratamientos de aguas, lo hace un proceso económico y viable para plantas de tratamiento pequeñas.

Sin embargo la razón principal para tomar en cuenta un encalado para el tratamiento de lodos de la PTAP regional Yanahurco es que ésta ha sido utilizada por años por especialistas en suelos para tratar los problemas de acidez que éstos presentan. La similitud de un suelo ácido al lodo que genera la planta lo hace la técnica más viable como etapa de tratamiento previo a la deshidratación.

#### *1.3.10.7.1 Beneficios del encalado*

Después de su aplicación se identifican los siguientes:

- Elevación de pH de una sustancia ácida.
- De acuerdo al material de encalado aumenta la disponibilidad de Ca y Mg.
- Elimina el aluminio presente en el suelo que impide crecimiento de plantas.
- Reduce el hierro en exceso que contribuye a generar acidez.
- Aumenta la capacidad de intercambio catiónico.

#### *1.3.10.8 Secado*

Esta etapa dependerá en gran medida del tipo de tratamiento realizado. No es aconsejable realizar un tratamiento de secado solar de lodos, con un coagulante que es muy utilizado en PT por su precio, como lo es el sulfato de aluminio.

Así lo presenta el artículo publicado por el laboratorio de investigaciones ambientales de la Universidad autónoma de Morelos (1995), de la planta de lodos residuales del Valle de Cuernavaca, donde presentan una propuesta para el manejo de lodos residuales, misma en la cual nunca lograron secar dichos lodos ya que éstos habían formado hidróxidos hidratados insolubles con las sales de aluminio adicionadas, que retenían fuertemente a las moléculas de agua, evitando su evaporación.

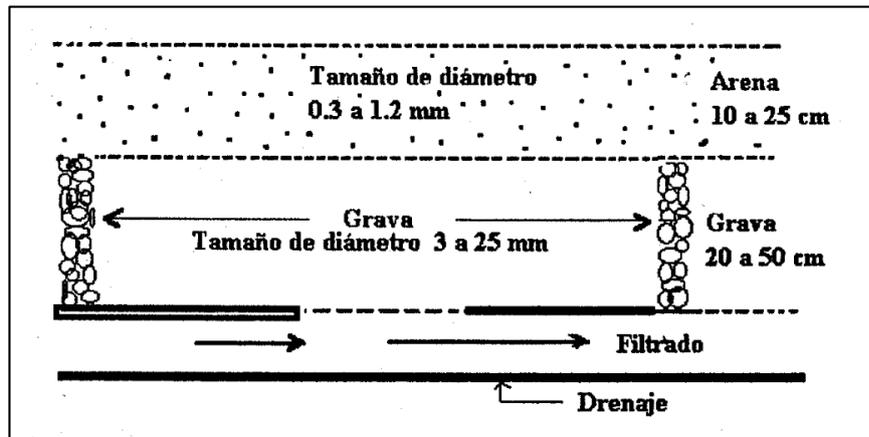
A pesar de ello no solo se puede utilizar un secado por rayos solares, de acuerdo a los recursos las PT pueden adaptarse al que mejor le convenga. Así la deshidratación se lo puede clasificar en deshidratación natural y mecánica.

✓ Deshidratación Natural

Un sistema de secado natural posee mayor ventaja respecto a un sistema de tratamiento de lodos mecánico en el ámbito económico, idóneo para la PTAP regional Yanahurco que requiere optimizar recursos en el tratamiento de lodos. Es económicamente viable para la planta debido a que el sistema de secado natural su bajo costo radica en su implementación y operación cuando se tiene un lugar definido para su asentamiento. (Ramalho, 1991)

Si bien es cierto que este tratamiento es el más idóneo para plantas que producen cantidades de lodo pequeñas, muchas de las veces este tipo de plantas no cuentan con el espacio necesario para su implementación y menos con la mano de obra necesaria para su remoción cuando así lo requiera.

Los lechos de secado tienen un sistema de secado de dos maneras, por percolación y por evaporación de agua, el primero se lo realiza a través de la grava de arena y los tubos recolectores de agua; y la evaporación por medio de las condiciones atmosféricas del medio, siendo ésta una desventaja y retardando un secado práctico.



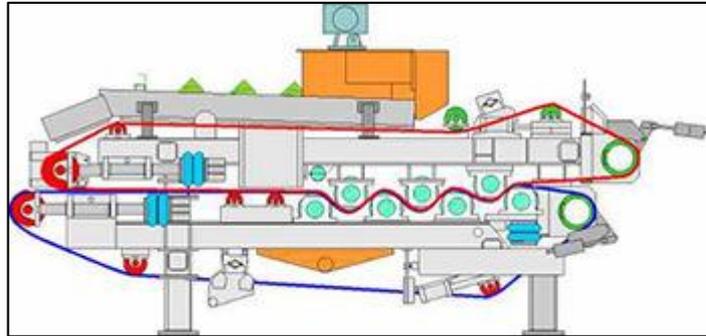
**Figura 2-1:** Estructura de un lecho de secado típico

Fuente: (Ramalho, 1991)

✓ Deshidratación mecánica

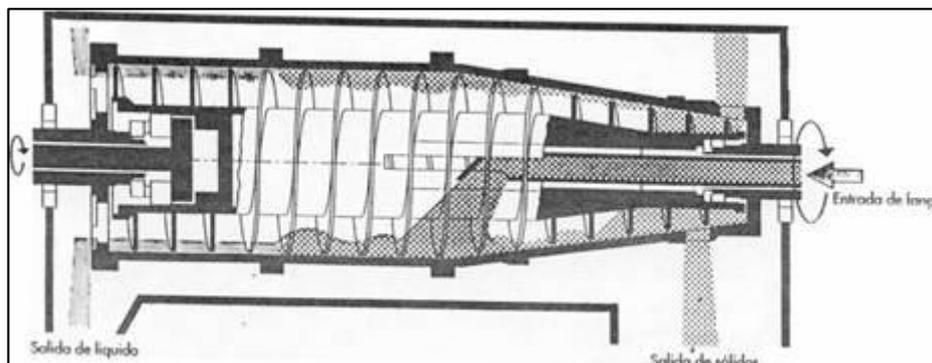
La deshidratación mecánica se caracteriza netamente porque se requiere la intervención de una operación mecánica que facilite la separación del agua del lodo generado. Dentro de estas operaciones mecánicas están la filtración y centrifugación con todas sus variantes de acuerdo a la necesidad de la empresa. Además existe un método no muy utilizado debido a su alto costo que es el secado térmico, que como su nombre indica requiere calor para crear una masa fina completamente seca. (Ramírez, 2008)

Dentro de la filtración podemos mencionar filtros de prensa o filtros de banda, los primeros someten el lodo a una alta presión con unas telas que circulan dentro del equipo. El filtro de banda lleva el lodo dentro de unas bandas transportadoras que en el camino dentro del filtro progresivamente elimina el agua de su contenido.



**Figura 3-1:** Estructura de un filtro de bandas  
Fuente: (Ramírez, 2008)

La centrífuga somete al lodo a una serie de movimientos centrífugos que separan el líquido hacia fuera, y las partículas más gruesas hacia dentro siendo éste un proceso más costoso, sin embargo más eficiente. Es importante conocer que para cualquier método de deshidratación mecánica es necesario previamente añadir un agente coagulante para retener las partículas eficientemente. (Ramírez, 2008)



**Figura 4-1:** Centrífuga de deshidratación  
Fuente: (Ramírez, 2008)

### ***1.3.11 Análisis de las muestras post tratamiento***

Los análisis previos al tratamiento muestran los valores de aluminio y hierro como los parámetros a tomar en cuenta después que los lodos sean tratados. El pH es otro parámetro importante puesto que la acidez es lo que variará en ese lapso de tiempo.

Se formaron 6 muestras, cada una formada por un litro de lodo y una concentración de cal diferente.

**Tabla 6-1.** Muestras con su concentración de cal

| Muestra | Concentración de cal (g/l) |
|---------|----------------------------|
| 1       | 0.4                        |
| 2       | 0.8                        |
| 3       | 1.6                        |
| 4       | 3.2                        |
| 5       | 6.4                        |
| 6       | 12.8                       |

Realizado por: Washington Arosteguí, 2017

La muestra número 2 (señalada) es la calculada en base a toda la información planteada, misma que es el doble de la muestra 1. De igual forma la muestra 3 es el doble de la segunda hasta llegar a la sexta que es el doble de la quinta.

El encalado cuando se realiza en condiciones normales (CN) es un proceso de lenta reacción y su tiempo de espera varía de acuerdo a distintas bibliografía. Dada las bajas solubilidades de las cales se requiere tiempo para la reacción, mínimo de 20 a 30 días y hasta seis meses para empezar a ver resultados. (Osorio, 2014)

El encalado se estima ayuda a los suelos durante 10 años aproximadamente hasta que el suelo empieza su decaimiento de nutrientes nuevamente. Lo que lleva a tener una positiva perspectiva en cuanto a los lodos es que, éstos al tener una alta humedad aumentará la velocidad de reacción, reduciendo ese tiempo.

Realizando así el análisis respectivo de las 6 muestras en tres fases:

- ✓ Primer análisis (un día posterior a la adición de cal).
- ✓ Segundo análisis (luego de un mes de la adición de cal).
- ✓ Tercer análisis (luego de 6 meses de la adición de cal).

## **1.4 Beneficiarios directos e indirectos**

### ***1.4.1 Directos***

El presente proyecto se estima beneficie directamente a la Planta de Tratamiento de Agua Potable regional Yanahurco y el ambiente en general. La primera ya que está diseñado estrictamente para implementarse en las instalaciones con las que cuenta la Planta, tomando en cuenta todas las variables de los procesos que aquí se realizan. Con ello a su vez se evita un daño ambiental al desechar el lodo que con características ácidas puede tener contacto con el suelo.

### ***1.4.2 Indirectos***

El impacto del Proyecto se estima que al evitar que los suelos puedan contaminarse de alguna forma y al ser suelos netamente destinados para la producción agrícola de la zona se vean beneficiados los habitantes aledaños al sector y el cantón Mocha en general con sus 6 777 habitantes, ya que al ser la agricultura la actividad comercial que más réditos genera al cantón, ésta se vería perjudicada por la contaminación ambiental, sin contar los demás cantones como Cevallos, Quero, Tisaleo y parte de Ambato, a los cuales la PTAP regional Yanahurco brinda sus Servicios.

## CAPÍTULO II

### 2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

#### 2.1 Objetivo general

Realizar el diseño de un sistema de tratamiento de lodos proveniente de la planta de agua potable regional Yanahurco ubicada en el cantón Mocha en la provincia de Tungurahua.

#### 2.2 Objetivos específicos

- ✓ Realizar una caracterización física, química y microbiológica de los lodos provenientes de la planta basándonos en la norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002.- (PROTECCIÓN AMBIENTAL- LODOS Y BIOSÓLIDOS-).
- ✓ Establecer las variables de diseño, en base a los parámetros fuera de norma o irregulares del lodo producido en la planta.
- ✓ Realizar el diseño de ingeniería del sistema de tratamiento de lodos en base a las variables de diseño.
- ✓ Realizar una validación técnica del tratamiento propuesto a través de una correlación de las variables de diseño.

## CAPÍTULO III.

### 3 ESTUDIO TÉCNICO

#### 3.1 Localización del proyecto

La Planta de Tratamiento de Agua Potable regional Yanahurco se encuentra ubicada en la Provincia de Tungurahua, Cantón Mocha, a 4 Km aproximadamente de la parte céntrica del cantón. A 3280 metros sobre el nivel del mar.

##### 3.1.1 Macro localización

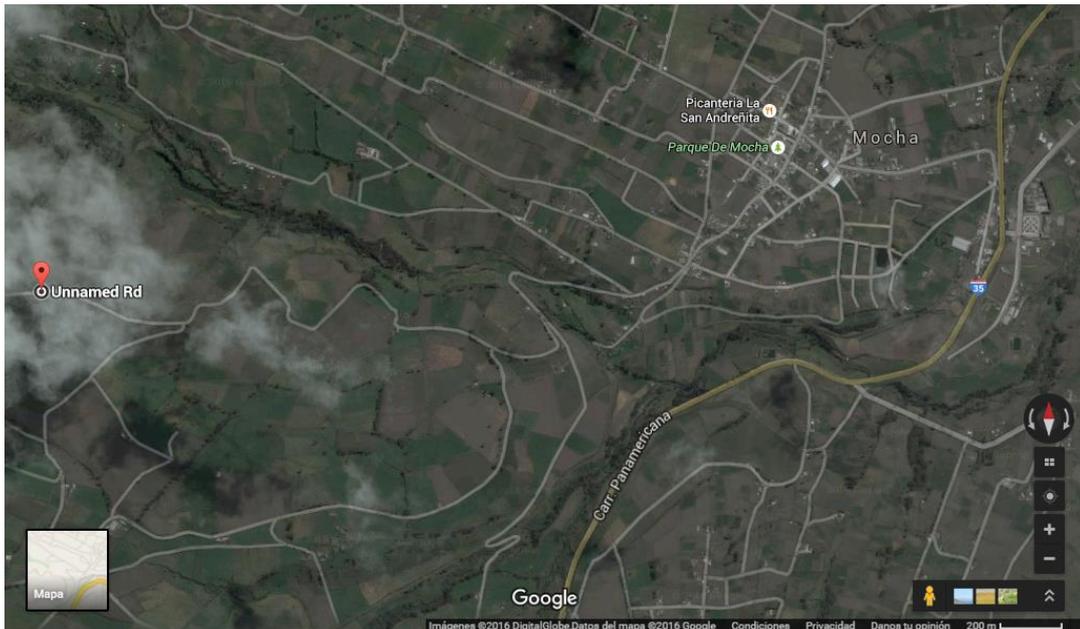
**Tabla 1-3:** Macro localización

|  |                 |                                      |
|--|-----------------|--------------------------------------|
| CONTINENTE   |                 | América                              |
| PAIS   |                 | Ecuador                              |
| PROVINCIA  |                 | Tungurahua                           |
| CANTON   |                 | Mocha                                |
| LATITUD  |                 | -1.4235                              |
| LONGITUD   |                 | -78.6849                             |
| ALTITUD  |                 | 3280 m.s.n.m                         |
| ECOSISTEMA<br>Bosque<br>siempreverde<br>montano alto | COBERTURA       | Bosque                               |
|  | BIOCLIMA        | Pluvial                              |
|  | OMBROTIPO       | Húmedo a<br>hiperhúmedo              |
|  | TERMOTIPO       | Supratropical inferior<br>y superior |
|  | RELIEVE GENERAL | De montaña                           |
|  | MACRORELIEVE    | Montaña y Serranía                   |
|  | MESORELIEVE     | Relieve montañosos,<br>edificios     |
|  | FENOLOGÍA       | Siempreverde                         |

**Fuente:** Ministerio de ambiente del Ecuador, 2012

**Realizado por:** Washington Arosteguí, 2016

### 3.1.2 Localización geográfica



**Fotografía 1-3:** Localización geográfica de la PTAP regional Yanahurco  
Fuente: Ministerio de ambiente del Ecuador, 2012

## 3.2 Ingeniería del proyecto

El lodo producido por la PT de agua potable, no lleva una carga biológica significativa que implique la utilización de procesos de descomposición por bacterias (68% de materia orgánica) que me ayude a aprovechar dicho lodo de forma eficiente, y su alto contenido de agua (99% de humedad cuando lo recomendable es 50% a 70%) dificulta la circulación de oxígeno y su manejo en sí. (SAGARPA, 2007)

Resta analizar una posible deshidratación de éstos o la manera más conveniente de acuerdo a las condiciones que tenemos. Se debe realizar el cálculo de la cantidad total de lodos generados en la PTAP regional Yanahurco que van a ser tratados diariamente a fin de tener una cantidad de referencia.

No es posible establecer un caudal debido a que la generación de lodos es un proceso discontinuo que se descarga en distintas horas del día.

### 3.2.1 Volumen de lodos generados en la PT

Para conocer el volumen de lodo generado en toda la planta se procede a tomar medidas del largo, ancho, y altura de los contenedores de lodo, que en este caso son sedimentadores y filtros.

Se aplican fórmulas de volumen de un paralelogramo rectángulo, debido a que ésta es la forma del sedimentador que contiene los lodos y el lodo al ser un fluido Newtoniano adopta dicha forma. (Cerón, 2016)

$$V = L1 * L2 * h$$

**Ecuación 1:** Volumen de un paralelogramo

donde:

V: Volumen

L1: Lado 1

L2: Lado 2

h: Altura

Las medidas tomadas del sedimentador y filtro se resumen en la siguiente tabla, tomando en cuenta las medidas máximas de espesor que los lodos pueden llegar a tener en cada uno:

**Tabla 2-3:** Medidas de sedimentador y filtro

| Equipo       | Lado 1 (m) | Lado 2 (m) | Altura (m) |
|--------------|------------|------------|------------|
| Sedimentador | 7.47       | 3          | 0.5        |
| Filtro       | 3          | 4.5        | 0.25       |

Realizado por: Washington Arosteguí, 2016

#### 3.2.1.1 Cálculo del volumen total de lodos en los dos sedimentadores:

$$V_S = L1 * L2 * h$$

$$V_S = 7.47 \text{ m} * 3 \text{ m} * 0.5 \text{ m}$$

$$V_S = 11.21 \text{ m}^3(2)$$

$$V_{TS} = 22.42 \text{ m}^3$$

### 3.2.1.2 Cálculo del volumen total de lodos en los dos filtros:

$$\begin{aligned}V_F &= L1 * L2 * h \\V_F &= 3 \text{ m} * 4.5 \text{ m} * 0.25 \text{ m} \\V_F &= 3.38 \text{ m}^3 \text{ (2)} \\V_{TF} &= 6.76 \text{ m}^3\end{aligned}$$

### 3.2.1.3 Cálculo del volumen total de lodos generados por la planta de tratamiento:

$$\begin{aligned}V_{TL} &= V_{TS} + V_{TF} \\V_{TL} &= 22.42 \text{ m}^3 + 6.76 \text{ m}^3 \\V_{TL} &= 29.18 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Entonces la cantidad de lodos que la PTAP regional Yanahurco genera diariamente es de 29.18 m<sup>3</sup>. Por razones de diseño se establecerá en 30 m<sup>3</sup>.

## 3.2.2 Cálculos para el diseño

Se requiere 3 tanques para el sistema de tratamiento de lodos.

El tanque 1 o tanque de almacenamiento de lodos, debe tener una capacidad de tratar 29.18 m<sup>3</sup> diarios, por lo tanto el volumen de éste no será menor a esta cantidad y se lo establecerá en 30 m<sup>3</sup>.

El tanque 2 o tanque de agitación y mezcla, se establece de acuerdo a la cantidad del lodo sedimentado en el tanque 1, que es una parte del total de lodos producidos, se llena cada dos días y a su vez se trata con cal una vez lleno. Se diseña un solo tanque de 20 m<sup>3</sup> en lugar de dos de 10 m<sup>3</sup>, debido a que ésta fase del tratamiento requiere de un impulsor, que en gastos generales el consumo de energía en dos tanques es más alto, además de los gastos de construcción.

El tanque 3 servirá para almacenar el agua sobrenadante (lixiviados) de los dos tanques anteriores, previo a su expulsión como agua de regadío.

Al no tener todos los datos necesarios para los cálculos de diseño, debemos mencionar las proporciones típicas de un tanque agitador establecidas en relaciones matemáticas referentes a sus componentes. (McCabe, Smith, Harriott, 1998)

Siendo éstas las siguientes:

$$\frac{H}{D_t} = 1$$

**Ecuación 2:** Relación entre altura y diámetro del tanque

donde:

H: Es la altura del tanque

D<sub>t</sub>: Es el diámetro del tanque

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}$$

**Ecuación 3:** Relación entre el diámetro del impulsor y el diámetro del tanque

donde:

D<sub>a</sub>: Es el diámetro del impulsor

D<sub>t</sub>: Es el diámetro del tanque

$$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$$

**Ecuación 4:** Relación entre el ancho del deflector y el diámetro del tanque

donde:

J: Es ancho del deflector

D<sub>t</sub>: Es el diámetro del tanque

$$\frac{E}{D_t} = \frac{1}{3}$$

**Ecuación 5:** Relación entre la altura desde el fondo hasta el impulsor y el diámetro del tanque

donde:

E: Es la altura desde el fondo del impulsor

D<sub>t</sub>: Es el diámetro del tanque

$$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$$

**Ecuación 6:** Relación entre el ancho de las aspas y el diámetro del impulsor

donde:

W: Es el ancho de las aspas

Da: Es el diámetro del impulsor

$$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

**Ecuación 7:** Relación entre el largo de las aspas y el diámetro del impulsor

donde:

L: Es el largo de las aspas

Da: Es el diámetro del impulsor

Además para el cálculo del diámetro del tanque se toma en cuenta su relación con el radio:

$$r_t = \frac{D_t}{2}$$

**Ecuación 8:** Relación entre el radio del tanque y diámetro del tanque

donde:

r<sub>t</sub>: Radio del tanque

D<sub>t</sub>: Diámetro del tanque

### 3.2.2.1 Cálculo del diámetro del tanque 1

La ecuación que utilizamos para el cálculo del diámetro del tanque 1 es la del volumen de un cilindro:

$$V_{t1} = \pi r^2 h$$

**Ecuación 9:** Volumen de un cilindro

donde:

$V_{t1}$ : Es el volumen del tanque

$\pi$ : Constante

$r$ : Es el radio del cilindro (tanque)

$h$ : Es la altura del cilindro (tanque)

Reemplazando los datos de radio y altura en la ecuación del volumen del cilindro de acuerdo a la ecuación 2 y 8, tenemos:

$$\begin{aligned}V_{t1} &= \pi r^2 h \\30 \text{ m}^3 &= \pi \left(\frac{D_t}{2}\right)^2 D_t \\ \frac{30 \text{ m}^3(4)}{\pi} &= D_t^3 \\ \sqrt[3]{D_t^3} &= \sqrt[3]{38.19 \text{ m}^3} \\ D_t &= 3.37 \text{ m}\end{aligned}$$

### 3.2.2.2 Cálculo de la altura del tanque 1

En base a la ecuación 2 llegamos a obtener:

$$\begin{aligned}\frac{H}{D_t} &= 1 \\ H &= D_t \\ H &= 3.37 \text{ m}\end{aligned}$$

### 3.2.2.3 Cálculo de la altura de la llave de desfogue de agua en el tanque 1

Se realizó 4 pruebas de sedimentación de lodo, en vasos de precipitación de 1000 ml, se confirmó que durante un día el lodo de la PT de agua potable regional Yanahurco sedimenta a no más de 332 ml en cada prueba, lo que representa 1/3 del volumen total de lodo descargado en un día.

Por lo tanto el volumen de lodo generado en el tanque 1 durante un día es:

$$\begin{aligned}V_{\text{Lodo sedimentado tanque 1}} &= \frac{1}{3} V_T \\ V_{\text{Lodo sedimentado tanque 1}} &= \frac{1}{3} \left(29.18 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right) \\ V_{\text{Lodo sedimentado tanque 1}} &= 9.73 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Para conocer la altura que alcanza el lodo, éste valor junto con el diámetro del cilindro calculado anteriormente se reemplaza en la ecuación 9 del volumen de un cilindro:

$$V = \pi r^2 h$$

$$9.73 \text{ m}^3 = \pi \left( \frac{3.37 \text{ m}}{2} \right)^2 h$$

$$h = 1.09 \text{ m}$$

#### 3.2.2.4 Cálculo del diámetro del tanque 2

Conociendo el volumen de lodos que es desechado del tanque 1, se diseña un tanque que se llene cada dos días, es decir el volumen de lodos diarios del tanque 1 que es  $9.73 \text{ m}^3$  por 2, en total  $19.46 \text{ m}^3$ . Se establecerá en  $20 \text{ m}^3$ .

$$V_{t2} = \pi r^2 h$$

$$20 \text{ m}^3 = \pi \left( \frac{Dt}{2} \right)^2 Dt$$

$$\frac{20 \text{ m}^3 (4)}{\pi} = Dt^3$$

$$\sqrt[3]{Dt^3} = \sqrt[3]{25.46 \text{ m}^3}$$

$$Dt = 2.94 \text{ m}$$

#### 3.2.2.5 Cálculo de la altura del tanque 2

$$\frac{H}{Dt} = 1$$

$$H = Dt$$

$$H = 2.94 \text{ m}$$

#### 3.2.2.6 Cálculo de la altura de la llave de desfogue de agua en el tanque 2

El lodo encalado tiende a sedimentar aún más, y en el transcurso de 24 horas, el lodo encalado en un vaso de precipitación de  $1000 \text{ ml}$  sedimentó hasta  $790 \text{ ml}$ .

$$\frac{790 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} = 0.79$$

Éste valor representa el porcentaje del total de lodos que sedimenta en el tanque 2.

$$V_{\text{Lodo sedimentado tanque 2}} = 0.79V_T$$

$$V_{\text{Lodo sedimentado tanque 2}} = 0.79\left(19.46 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right)$$

$$V_{\text{Lodo sedimentado tanque 2}} = 15.37 \text{ m}^3$$

De acuerdo al volumen de lodo se estima la altura de la llave de desfogue de agua:

$$V = \pi r^2 h$$

$$15.37 \text{ m}^3 = \pi \left(\frac{2.94 \text{ m}}{2}\right)^2 h$$

$$h = 2.26 \text{ m}$$

### 3.2.2.7 Cálculo del diámetro del impulsor en el tanque 2

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}$$

$$D_a = \frac{1}{3} D_t$$

$$D_a = \frac{1}{3} (2.94 \text{ m})$$

$$D_a = 0.98 \text{ m}$$

### 3.2.2.8 Cálculo de la distancia desde el fondo del tanque al impulsor

$$\frac{E}{D_t} = \frac{1}{3}$$

$$E = \frac{1}{3} D_t$$

$$E = \frac{1}{3} (2.94 \text{ m})$$

$$E = 0.98 \text{ m}$$

### 3.2.2.9 Cálculo del largo de las aspas

$$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

$$L = \frac{1}{4} (0.98 \text{ m})$$

$$L = 0.245 \text{ m}$$

### 3.2.2.10 Cálculo del ancho de las aspas

$$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$$

$$W = \frac{1}{5} D_a$$

$$W = \frac{1}{5} (0.98 \text{ m})$$

$$W = 0.196 \text{ m}$$

### 3.2.2.11 Cálculo del ancho de los deflectores

$$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$$

$$J = \frac{1}{12} D_t$$

$$J = \frac{1}{12} (2.94 \text{ m})$$

$$J = 0.245 \text{ m}$$

### 3.2.2.12 Cálculo de la potencia requerida del impulsor

El valor de potencia requerida nos indica la fuerza necesaria para que el rodete se mueva sin dificultad a fin de que se realice una mezcla completa y efectiva de los componentes dentro del tanque. Para ello se toma en cuenta la naturaleza del fluido a tratar, es decir si es newtoniano o no newtoniano.

El lodo proveniente de la planta de tratamiento de agua potable regional Yanahurco, cumple con las características netas de un lodo newtoniano, ya que una vez deformado, al tener una alta humedad éste retoma su forma anterior.

Según McCabe, Smith y Harriott (Operaciones Unitarias en Ingeniería Química) la Potencia requerida para mover un fluido Newtoniano se basa en la siguiente ecuación:

$$P = \frac{N_p D_a^5 N^3 \rho}{g_c}$$

**Ecuación 10:** Cálculo de potencia

donde:

$N_p$ : Numero de potencia.

$D_a$ : Diámetro del tanque agitador.

$N$ : Velocidad de giro.

$\rho$ : Densidad.

$G_c$ : constante adimensional 32.17 (debido a que en este flujo se aplica la ley de Newton).

El valor de  $N_p$  se obtiene mediante la tabla  $N_p$  vs  $N_{Re}$  (Número de Reynolds), estableciendo previamente el número de placas deflectoras y el número de palas del rodete.

Para el cálculo del número de Reynolds tenemos:

$$N_{Re} = \frac{NDa^2\rho}{\mu}$$

**Ecuación 11:** Cálculo del número de Reynolds

donde:

$N$ : Velocidad de giro.

$D_a$ : Diámetro del tanque agitador.

$\rho$ : Densidad.

$\mu$ : Viscosidad del fluido.

El valor de la viscosidad lo determinamos experimentalmente con la velocidad de caída de una esfera en una probeta llena del lodo a tratar, y tomamos el tiempo repetidamente a fin de tener datos que respalden el valor final, estos valores los adecuamos a la ecuación de viscosidad.

$$V = \frac{2g(\rho_e - \rho_f)R^2}{9\mu}$$

**Ecuación 12:** Velocidad de caída de una esfera en base a la viscosidad

donde:

$V$ : Velocidad de caída de la esfera.

$g$ : Gravedad (9.8 m/s<sup>2</sup>).

$\rho_e$ : Densidad de la esfera.

$\rho_f$ : Densidad del fluido.

$R$ : Radio.

$\mu$ : Viscosidad.

Los datos para la ecuación de viscosidad los calculamos a continuación:

*Velocidad:* Para el cálculo de la velocidad se relaciona la distancia recorrida por la esfera en caída libre (largo de la probeta) a través del fluido, y se toma el tiempo tanto al inicio del movimiento como al final que es cuando la esfera topa la base de la probeta, de la siguiente manera:

$$V = \frac{\text{distancia de recorrido}}{\text{tiempo}}$$

**Ecuación 13:** Velocidad de caída de una esfera en base a la distancia recorrida

Para lo cual se repite su caída en un tubo de longitud conocida:

**Tabla 3-3:** Datos para cálculos de velocidad de caída de la esfera

| <b>Repetición</b>     | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Distancia (cm)</b> | 113      | 113      | 113      | 113      | 113      |
| <b>Tiempo(s)</b>      | 6.44     | 6.43     | 6.43     | 6.43     | 6.44     |

Fuente: Realizado por Washington Arosteguí, 2016

Esta acción se ha repetido 5 veces consideradas necesarias hasta tener resultados semejantes, y el valor final será determinado por el valor que más veces se repita, de no repetirse ningún valor se estimará una media de todos los resultados obtenidos. En este caso es 6.43 segundos.

$$V = \frac{\text{distancia de recorrido}}{\text{tiempo}}$$

$$V = \frac{113 \text{ cm}}{6.43 \text{ s}} * \frac{1m}{100cm}$$

$$V = 0.18 \frac{m}{s}$$

*Densidad de la esfera:* Se mide el peso de la esfera en una balanza analítica y se lo divide para su volumen, este último se define por la ecuación del volumen de una esfera:

$$\rho_e = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

**Ecuación 14:** Densidad de una esfera

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

**Ecuación 15:** Volumen de una esfera

En donde es necesario un radio medido con la ayuda de un pie de rey, estableciendo con ello la siguiente tabla:

**Tabla 4-3:** Datos para cálculo de la densidad de una esfera.

|                                       |        |
|---------------------------------------|--------|
| <b>Masa de la esfera (canica) (g)</b> | 5.14   |
| <b>Radio de la esfera (m)</b>         | 0.0085 |

Fuente: Realizado por Washington Arosteguí, 2016

$$\rho_e = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

$$\rho_e = \frac{5.14 \text{ g}}{\frac{4}{3}\pi(0.0085 \text{ m})^3}$$

$$\rho_e = \frac{5.14 \text{ g}}{0.00000257 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}$$

$$\rho_e = 2000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Estos datos los reemplazamos en la ecuación de la velocidad basada en la viscosidad de un fluido que se estableció anteriormente.

$$V = \frac{2g(\rho_e - \rho_f)R^2}{9\mu}$$

$$0.18 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \frac{2(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(2000 - 990) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (0.0085)^2}{9\mu}$$

$$\mu = \frac{19796 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \text{m}^2} (0.0085) \text{m}^2}{1.62 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$\mu = 0.88 \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$$

$$\mu = 0.88 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Una vez obtenido el valor de la viscosidad, se reemplaza este valor en la ecuación que busca el número de Reynolds del lodo de la Planta de Agua Potable regional Yanahurco, estableciendo una velocidad de mezcla que de acuerdo a procedimientos experimentales de mezclado no debe

ser menor de 125 revoluciones por minuto, durante 10 minutos que debe accionarse el agitador, o simplemente hasta ver el fluido completamente homogéneo con las sustancias adicionadas para su tratamiento.

$$N_{Re} = \frac{NDa^2\rho}{\mu}$$

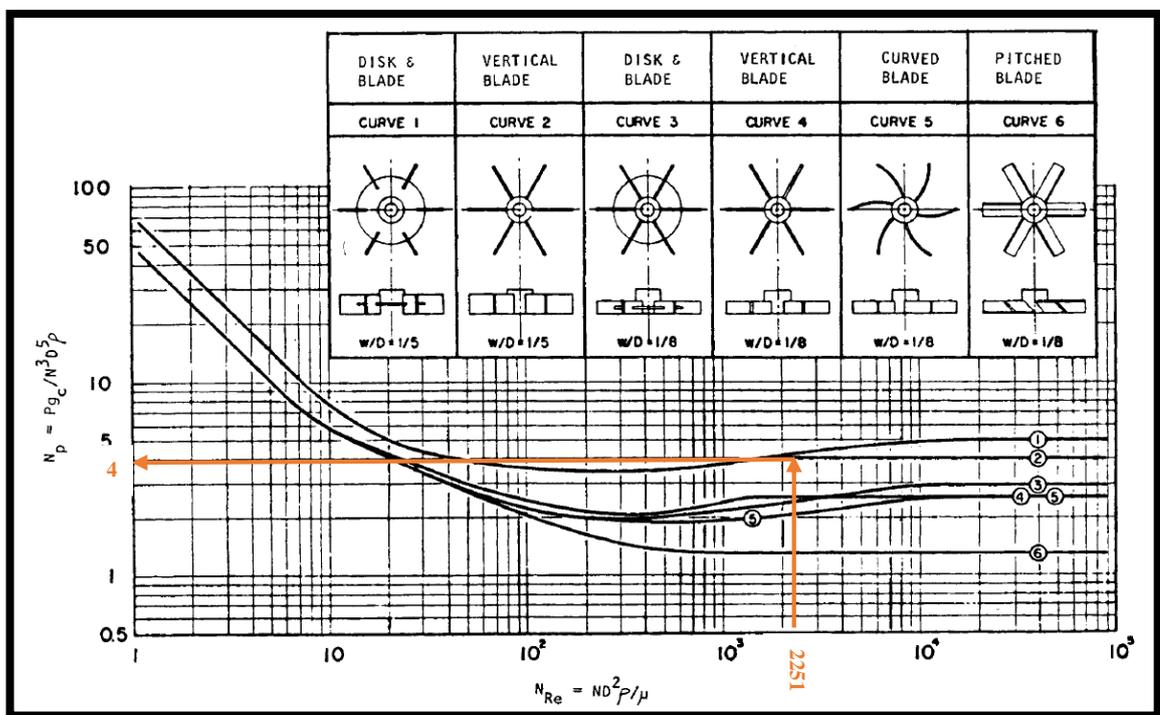
$$N_{Re} = \frac{125 \frac{rev}{min} (0.98 \text{ m})^2 (990) \frac{kg}{m^3}}{0.88 \frac{kg}{m \cdot s}}$$

$$N_{Re} = \frac{2.08 \frac{rev}{s} (0.98 \text{ m})^2 (990) \frac{kg}{m^3}}{0.88 \frac{kg}{m \cdot s}}$$

$$N_{Re} = 2251$$

El valor de Reynolds me indica si el fluido en movimiento es laminar o turbulento. En la agitación se presentan condiciones turbulentas para  $N_{re} > 20000$  y condiciones laminares para  $N_{re} < 10$  (Chohey & Hicks, 1986),

El lodo en tratamiento mantiene su valor en un régimen de transición o intermedio.



**Gráfico 1-3:**  $N_p$  vs  $N_{Re}$  para diferentes agitadores

Fuente: (Ricaurte, 2016)

Para determinar el valor del número de potencia  $N_p$ , se toma el valor de Reynolds y lo proyectamos en las Tablas  $N_p$  vs  $N_{Re}$ , para la curva 2, que me indica la forma y el número de palas para el sistema de tratamiento propuesto, con 4 placas deflectoras.

$$P = \frac{N_p D_a^5 N^3 \rho}{g_c}$$

$$P = \frac{4 (0.98)^5 m^5 (2.08)^3 \frac{rev}{s^3} (990) \frac{kg}{m^3}}{32.17 \frac{kg \cdot m}{kgf \cdot s^2}}$$

$$P = 1001.3 W$$

$$P = 1.34 Hp$$

### 3.2.2.13 Cálculo del diámetro del tanque 3

El tanque 3 debe tener una capacidad para retener 44.63 m<sup>3</sup> de agua sobrenadante de los dos tanque anteriores, ya que diariamente se eliminan 20 m<sup>3</sup> del tanque 1, que al segundo día serán 40 m<sup>3</sup>; y, 4.63 m<sup>3</sup> del tanque 2 al segundo día, con lo que el tanque 3 abastecerá su capacidad.

$$V_{t3} = \pi r^2 h$$

$$45 m^3 = \pi \left(\frac{D_t}{2}\right)^2 Dt$$

$$\frac{45 m^3 (4)}{\pi} = Dt^3$$

$$\sqrt[3]{Dt^3} = \sqrt[3]{57.296 m^3}$$

$$Dt = 3.86 m$$

### 3.2.2.14 Cálculo de la altura del tanque 3

$$\frac{H}{Dt} = 1$$

$$H = Dt$$

$$H = 3.86 m$$

### 3.2.2.15 Cálculo del área de secado

El diseño de un secador para los lodos de la PTAP regional Yanahurco toma en cuenta un factor importante como el grado de aluminio reaccionado hasta este punto del tratamiento.

Debido a que el encalado es un proceso de reacción lenta, y el lodo continúa reaccionando incluso meses después del encalado, es necesario indicar que en el lodo de salida del tanque 3 se encuentra gran cantidad de aluminio intercambiable que no ha reaccionado aun con la cal. Este aluminio al estar disuelto en el lodo, y al ser dispuesto en un área de secado de gran porosidad tiende a filtrarse suelo adentro, evitando que reaccione a lo previsto en el diseño anterior.

Con ello el diseño del área de secado más conveniente es un tanque rectangular de un área de contacto amplia con el lodo, para su mejor distribución superficial. El beneficio de crear un área de secado de estas características es que sin importar las condiciones climáticas el contenido de aluminio a reaccionar siempre permanecerá dentro del área de secado.

$$\text{Volumen secador} = \text{ancho} \times \text{largo} \times \text{profundidad}$$

**Ecuación 16:** Volumen de secador

El área de secado debe tener una capacidad para recibir  $15.36 \text{ m}^3$  cada dos días. Estimando el tiempo de reacción de la cal para un mes, se define este tiempo como el límite de limpieza del área de secado. Entonces en un mes se realizan alrededor de 15 descargas de lodo:

$$\text{Volumen de lodo mensual} = 15.36 \text{ m}^3 * 15$$

$$\text{Volumen de lodo mensual} = 230.4 \text{ m}^3$$

Entonces se proyecta un tanque secador rectangular no menor a  $230.4 \text{ m}^3$  de volumen, con un largo de 20 m, ancho de 15 m y una profundidad corta de 1 m, con el fin de evitar sombras con alguna pared del tanque que evite un secado uniforme:

$$\text{Volumen secador} = (15 \text{ m})(20 \text{ m})(1 \text{ m})$$

$$\text{Volumen secador} = 300 \text{ m}^3$$

$$\text{Area secador} = (15 \text{ m})(20 \text{ m})$$

$$\text{Area secador} = 300 \text{ m}^2$$

Para el acceso al área de secado es necesario la construcción de una rampa de acceso, incluso diseñada para vehículos si así lo decidiera la PTAP regional Yanahurco, a fin de cargar el lodo seco cuando se realice la limpieza.

La rampa estará localizada en un lado del secador, ocupando parte de los  $300 \text{ m}^2$ , con una base de 3 m.

$$\begin{aligned} \text{Volumen de la rampa} &= \frac{\text{base} \times \text{altura}}{2} \times \text{profundidad} \\ \text{Volumen de la rampa} &= \frac{3 \text{ m} \times 1 \text{ m}}{2} \times 15 \text{ m} \\ \text{Volumen de la rampa} &= 22.5 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Entonces el volumen real del área de secado será:

$$\begin{aligned} V_{rs} &= 300 \text{ m}^3 - 22.5 \text{ m}^3 \\ V_{rs} &= 277.5 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Este valor sigue siendo mayor al requerido, lo cual no influye en un posible exceso de lodo para el secador.

### 3.2.3 *Cálculos para el tratamiento*

#### 3.2.3.1 *Principales cationes en el suelo*

Se debe dar un enfoque de encalado basado en el suelo, que es de donde se tiene información probada y se han realizado tratamientos con cal, que esta vez se aplicará al lodo y en donde los cationes presentes son de gran importancia, éstos son los que posteriormente definirán la cantidad de cal a añadir para un tratamiento óptimo del lodo, tomando en cuenta sus marcadas diferencias de humedad.

Los cationes en el suelo se pueden encontrar en forma mineral o intercambiable, hablamos de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), que son los minerales que se encuentran en mayor proporción en el suelo y en los cuales es necesario basarse para eliminar las grandes cantidades de aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) y hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) presentes en el lodo de la PTAP regional Yanahurco. La medida de cationes en el suelo es en unidades de miliequivalentes químicos (meq-q) o centimoles en cada 100 gramos de suelo.

#### 3.2.3.2 *Cálculo de miliequivalentes (meq-q) de los principales cationes del lodo*

Se basa en los resultados de los análisis de lodo previo al tratamiento de encalado. Resultados expresado en unidades de mg/l, por lo que es necesario su conversión.

Calcio

$$(Ca^{2+}) = \frac{29.16 \text{ mg } Ca^{2+}}{1 \text{ l}} * \frac{1 \text{ g } Ca^{2+}}{1000 \text{ mg } Ca^{2+}} * \frac{1 \text{ mol } Ca^{2+}}{40.08 \text{ g } Ca^{2+}} * \frac{2 \text{ eq } - q \text{ } Ca^{2+}}{1 \text{ mol } Ca^{2+}} \\ * \frac{1000 \text{ meq } - q \text{ } Ca^{2+}}{1 \text{ eq } - q \text{ } Ca^{2+}} = 1.45 \frac{\text{meq} - q \text{ } Ca^{2+}}{\text{l}}$$

Magnesio

$$(Mg^{2+}) = \frac{7.43 \text{ mg } Mg^{2+}}{1 \text{ l}} * \frac{1 \text{ g } Mg^{2+}}{1000 \text{ mg } Mg^{2+}} * \frac{1 \text{ mol } Mg^{2+}}{24.31 \text{ g } Mg^{2+}} * \frac{2 \text{ eq } - q \text{ } Mg^{2+}}{1 \text{ mol } Mg^{2+}} \\ * \frac{1000 \text{ meq } - q \text{ } Mg^{2+}}{1 \text{ eq } - q \text{ } Mg^{2+}} = 0.61 \frac{\text{meq} - q \text{ } Mg^{2+}}{\text{l}}$$

Sodio

$$(Na^+) = \frac{6.35 \text{ mg } Na^+}{1 \text{ l}} * \frac{1 \text{ g } Na^+}{1000 \text{ mg } Na^+} * \frac{1 \text{ mol } Na^+}{22.99 \text{ g } Na^+} * \frac{1 \text{ eq } - q \text{ } Mg^{2+}}{1 \text{ mol } Mg^{2+}} \\ * \frac{1000 \text{ meq } - q \text{ } Mg^{2+}}{1 \text{ eq } - q \text{ } Mg^{2+}} = 0.28 \frac{\text{meq} - q \text{ } Na^+}{\text{l}}$$

Potasio

$$(K^+) = \frac{9.04 \text{ mg } K^+}{1 \text{ l}} * \frac{1 \text{ g } K^+}{1000 \text{ mg } K^+} * \frac{1 \text{ mol } K^+}{39.10 \text{ g } K^+} * \frac{1 \text{ eq } - q \text{ } K^+}{1 \text{ mol } K^+} * \frac{1000 \text{ meq } - q \text{ } K^+}{1 \text{ eq } - q \text{ } K^+} \\ = 0.23 \frac{\text{meq} - q \text{ } K^+}{\text{l}}$$

### 3.2.3.3 Cálculo de los miliequivalentes de aluminio intercambiable ( $Al^{3+}$ )

El aluminio reportado en los resultados es netamente aluminio intercambiable-disuelto, es decir en el que es posible provocar una reacción a fin de convertirlo en residuo insoluble.

$$(Al^{3+}) = \frac{41.08 \text{ mg } Al^{3+}}{1 \text{ l}} * \frac{1 \text{ g } Al^{3+}}{1000 \text{ mg } Al^{3+}} * \frac{1 \text{ mol } Al^{3+}}{26.98 \text{ g } Al^{3+}} * \frac{3 \text{ eq } - q \text{ } Al^{3+}}{1 \text{ mol } Al^{3+}} \\ * \frac{1000 \text{ meq } - q \text{ } Al^{3+}}{1 \text{ eq } - q \text{ } Al^{3+}} = 4.57 \frac{\text{ meq } - q \text{ } Al^{3+}}{\text{ l}}$$

#### 3.2.3.4 Cálculo de CIC

Su fórmula se basa en los cationes anteriormente calculados siendo:

$$CIC = \sum [meq - q \text{ } Ca^{2+} + meq - q \text{ } Mg^{2+} + meq - q \text{ } Na^{+} + meq - q \text{ } K^{+}]$$

**Ecuación 17:** Cálculo de CIC

donde:

CIC: Capacidad de intercambio catiónico

meq-q  $Ca^{2+}$ : Miliequivalentes de calcio

meq-q  $Mg^{2+}$ : Miliequivalentes de magnesio

meq-q  $Na^{+}$ : Miliequivalentes de sodio

meq-q  $K^{+}$ : Miliequivalentes de potasio

En este caso la cal será el reactivo y es necesario saber qué porcentaje de ella intercambiará sus iones con el lodo a tratar. Por ello:

$$CIC = \sum [meq - q \text{ } Ca^{2+} + meq - q \text{ } Mg^{2+} + meq - q \text{ } Na^{+} + meq - q \text{ } K^{+}] \\ CIC = \sum meq - q [1.46 + 0.61 + 0.28 + 0.23] \\ CIC = 2.58 \frac{\text{ meq } - q}{\text{ l}}$$

Para determinar los kilogramos de lodo se pesó 100 ml de lodo homogenizado (unidad de medida en la que se desarrolló los análisis por las características líquidas del mismo) y se observa su peso para posteriormente sacar su relación.

$$100 \text{ ml} \cong 102.59 \text{ g}$$

Entonces:

$$1000 \text{ ml} = 1 \text{ L} \cong 1.03 \text{ Kg}$$

Para realizar una estimación con la tabla 1-1, se lleva este valor a las unidades indicadas en dicha tabla.

$$CIC = 2.58 \frac{meq - q}{L} * \frac{1 L}{1.03 kg} * \frac{1 kg}{1000 g} = \frac{2.5 meq - q}{1000 g}$$

$$2.5 meq - q \rightarrow 1000 g$$

$$X \leftarrow 100 g$$

$$X = CIC = \frac{0.25 meq - q}{100 g}$$

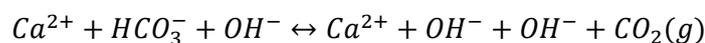
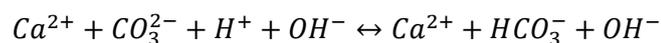
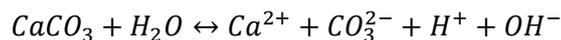
El 0.25 de CIC de acuerdo con la tabla 1-1 es un nivel de suelo muy bajo, óptimo para un intercambio de cationes adecuado, pero no idóneo para cultivos por el hecho de contar el lodo con mayor proporción de agua que de sólidos.

#### 3.2.3.4.1 Reacciones de encalado

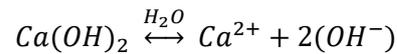
Es importante conocer la cantidad de los cuatro nutrientes ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ) que estén presentes en el lodo, ya que lo que se espera es que de acuerdo al tipo de cal que se elija, se libere el calcio presente en su estructura química, y los aniones producto de su disociación reaccionen con el  $Al^{3+}$  disuelto en el lodo, generando iones  $OH^-$  que reaccionaran con los  $H^+$ , como se presenta en la siguiente secuencia de reacciones para la calcita, el hidróxido de calcio y la cal viva que son los materiales de encalado de mayor capacidad.

Las reacciones de encalado se realizan con un mecanismo no tan complejo donde se distingue en dos fases, el primero la disociación del material, el segundo el intercambio para posterior reacción de neutralización con los elementos disociados.

- *Disociación de calcita (carbonato de calcio,  $CaCO_3$ )*

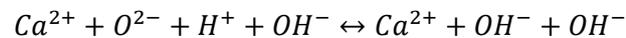
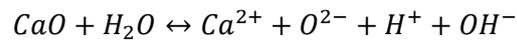


- *Disociación de cal hidratada [ hidróxido de calcio, Ca(OH)<sub>2</sub>]*



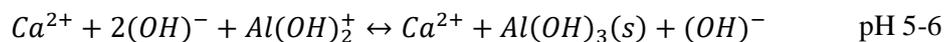
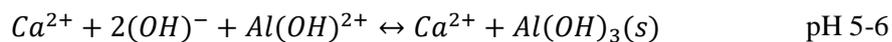
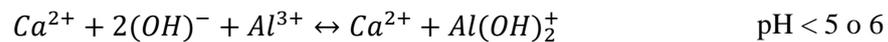
Esta disociación se realiza con agua en poca cantidad ya que la cal es hidratada, por lo que su disociación es más fácil de realizarla.

- *Disociación de la cal viva (Óxido de Calcio, CaO)*



El manejo de CaO puro desprende calor, por lo que es preferible manejar la cal hidratada o a su vez una mezcla entre las dos.

Notamos que en cada disociación de los materiales anteriores como producto genera calcio e iones hidroxilo. La neutralización se realiza con estos productos, que reaccionaran con las distintas formas del aluminio (ver figura 1.1) en el lodo y de acuerdo al pH.



### 3.2.3.5 Cálculo de calcio requerido basado en el aluminio intercambiable

En la corteza terrestre el calcio se encuentra en un 3.6% aproximadamente. De los cuatro cationes que las plantas aprovechan como nutrientes (calcio, magnesio, potasio, sodio), el calcio es el que en mayor proporción se encuentra, razón por la que se lo toma en cuenta en mayor proporción para los cálculos de CIC.

$$Ca^{2+} \left( \frac{cmol}{Kg} \right) = f * Al^{3+i}$$

**Ecuación 18:** Ecuación de aluminio intercambiable

donde:

Ca<sup>2+</sup>: Cantidad de calcio para encalado en unidades de cmol/kg

f: Factor de corrección (1.5 si el porcentaje de materia orgánica es ≤10% y 2 si es >10% )

Al<sup>3+i</sup>: Aluminio intercambiable en unidades de cmol/kg

Igualamos las unidades con un factor de conversión:

$$1 \frac{cmol}{Kg} = \frac{1 meq - q}{100 g}$$

$$1 \frac{cmol}{Kg} = \frac{1 meq}{100 g} * \frac{1000 g}{1 Kg}$$

$$1 \frac{cmol}{Kg} = 10 \frac{meq - q}{Kg}$$

$$1 cmol = 10 meq - q$$

El factor de corrección seleccionado es 2 por tener 68,45% de materia orgánica.

Reemplazando éstos datos en la ecuación 10 tenemos:

$$Ca^{2+} \left( \frac{cmol}{Kg} \right) = f * Al^{3+i}$$

$$Ca^{2+} \left( \frac{cmol}{Kg} \right) = 2 \left( 4.57 \frac{meq - q}{L} \right) \left( \frac{1 cmol}{10 meq - q} \right)$$

$$Ca^{2+} \left( \frac{cmol}{Kg} \right) = 0.914 \frac{cmol Ca^{2+}}{L} \left( \frac{0.01 mol Ca^{2+}}{1 cmol Ca^{2+}} * \frac{40.08 g Ca^{2+}}{1 mol Ca^{2+}} \right)$$

$$Ca^{2+} \left( \frac{cmol}{Kg} \right) \left( \frac{1.03 Kg}{1L} \right) = 0.37 \frac{g Ca^{2+}}{L}$$

$$Ca^{2+} = 0.36 \frac{g Ca^{2+}}{L lodo}$$

### 3.2.3.6 Cálculo de calcio requerido basado en la saturación del aluminio intercambiable

$$Ca^{2+} \left( \frac{cmol}{Kg} \right) = f[Al^{3+i} - RAS(Al^{3+i} + Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+)]$$

**Ecuación 19:** Ecuación basada en la saturación de aluminio intercambiable

donde:

Ca<sup>2+</sup>(cmol/kg): Cantidad de calcio para encalado en unidades de cmol/kg

f: factor de corrección (1.5 si el porcentaje de materia orgánica es ≤10% y 2 si es >10% )

RAS: Relación de sodio adsorbido

Al<sup>3+i</sup>: Aluminio intercambiable en el lodo en unidades de cmol/kg

Ca<sup>2+</sup>: Calcio presente en el lodo en unidades de cmol/kg

Mg<sup>2+</sup>: Magnesio presente en el lodo en unidades de cmol/kg

K<sup>+</sup>: Potasio presente en el lodo en unidades de cmol/kg

Na<sup>+</sup>: Sodio presente en el lodo en unidades de cmol/kg

El RAS es un factor que relaciona la salinidad de la sustancia en análisis, en este caso el lodo. Se expresa como fracción en valores comprendidos entre 0 y 1. Los iones como el calcio, magnesio y sodio son los más abundantes en el suelo, éste último en cantidades significativas provoca problemas en la presencia de agua y su filtración en el suelo. La presencia del calcio y magnesio son de gran ayuda para mitigar éstos problemas causados por el sodio.

Para determinar el RAS se emplea la ecuación:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

**Ecuación 20:** Relación de sodio adsorbido

Entonces se tiene:

$$RAS = \frac{0.28}{\sqrt{\frac{1.45 + 0.61}{2}}}$$
$$RAS = \frac{0.28}{1.02}$$
$$RAS = 0.28$$

Con estos datos se desarrolla la ecuación 18:

$$Ca^{2+} \left( \frac{cmol}{Kg} \right) = 2 \left[ \left( 4.57 \frac{meq - q}{L} \right) - 0.28(4.57 + 1.45 + 0.61 + 0.23 + 0.28) \left( \frac{meq - q}{L} \right) \right]$$

$$Ca^{2+} \left( \frac{cmol}{Kg} \right) = 2 \left[ \left( 4.57 \frac{meq - q}{L} \right) - 1.99 \left( \frac{meq - q}{L} \right) \right]$$

$$Ca^{2+} \left( \frac{cmol}{Kg} \right) \left( \frac{1.03 Kg}{1 L} \right) = 5.16 \left( \frac{meq - q}{L} \right) \left( \frac{1 cmol}{10 meq - q} \right)$$

$$Ca^{2+} \left( \frac{cmol}{L} \right) = 0.5 \frac{cmol Ca^{2+}}{L} \left( \frac{0.01 mol Ca^{2+}}{1 cmol Ca^{2+}} * \frac{40.08 g Ca^{2+}}{1 mol Ca^{2+}} \right)$$

$$Ca^{2+} \left( \frac{cmol}{L} \right) = 0.2 \frac{g Ca^{2+}}{L}$$

Según la pureza de la cal que se utiliza en el proceso de encalado con los compuestos hidróxido de calcio  $Ca(OH)_2$  y Carbonato de calcio  $CaCO_3$ , determinaremos la cantidad real de cal:

$$1 g cal \rightarrow 63.29\% Ca(OH)_2 \rightarrow 0.63 g Ca(OH)_2$$

$$1 g cal \rightarrow 29.35\% CaCO_3 \rightarrow 0.29 g CaCO_3$$

### 3.2.3.7 Cálculo del PRNT

Su fórmula es:

$$PRNT = \frac{EG * EQ}{100}$$

donde:

PRNT: Poder relativo de neutralización total

EG: Eficiencia granulométrica

EQ: Equivalente químico.

La cal utilizada posee una mezcla de dos componentes muy utilizados para encalar, hidróxido de calcio y carbonato de calcio, para las cuales se calcula su respectivo PRNT, sabiendo que la cal posee un número de malla de 42, que según la tabla 1-8 le da una EG de 60%, y para cada compuesto la tabla 1.4 indica valores de EQ del hidróxido de 138 % y del carbonato de 100 %.

$$PRNT_{Ca(OH)_2} = \frac{60 \% * 138 \%}{100}$$

$$PRNT_{Ca(OH)_2} = 82.8 \%$$

$$PRNT_{CaCO_3} = \frac{60\% * 100\%}{100}$$

$$PRNT_{CaCO_3} = 60\%$$

Entonces calculamos el PRNT de la cal tomando en cuenta sus fracciones:

$$PRNT = (0.63)PRNT_{Ca(OH)_2} + (0.29)PRNT_{CaCO_3}$$

$$PRNT = (0.63)(82.8\%) + (0.29)(60\%)$$

$$PRNT = 70\%$$

Es decir el 70% de la cal reaccionara dentro de los primeros seis meses y el otro 30% dentro de los meses posteriores.

### 3.2.3.8 Cálculo de los gramos de calcio por gramo de cal

Al tener dos fuentes significativas de calcio en la cal que se utiliza, que son el hidróxido de calcio  $Ca(OH)_2$  y carbonato de calcio  $CaCO_3$ , calculamos en cada uno la cantidad de calcio que proveen:

$$0.63 \text{ g } Ca(OH)_2 * \frac{1 \text{ mol } Ca(OH)_2}{74.08 \text{ g } Ca(OH)_2} * \frac{1 \text{ mol } Ca^{2+}}{1 \text{ mol } Ca(OH)_2} * \frac{40.08 \text{ g } Ca^{2+}}{1 \text{ mol } Ca^{2+}} = 0.34 \text{ g } Ca^{2+}$$

$$0.29 \text{ g } CaCO_3 * \frac{1 \text{ mol } CaCO_3}{100.09 \text{ g } CaCO_3} * \frac{1 \text{ mol } Ca^{2+}}{1 \text{ mol } CaCO_3} * \frac{40.08 \text{ g } Ca^{2+}}{1 \text{ mol } Ca^{2+}} = 0.12 \text{ g } Ca^{2+}$$

$$0.34 \text{ g } Ca^{2+} + 0.12 \text{ g } Ca^{2+} = 0.46 \text{ g de Calcio}$$

Sumando los dos valores se tiene que cada gramo de cal que se añade al lodo, provee de 0.46 g de calcio, es decir el 46 %.

### 3.2.3.9 Cálculo de los gramos de cal necesarios para encalar

$$1 \text{ g cal} \rightarrow 0.46 \text{ g } Ca^{2+}$$

La cantidad necesaria de calcio para disminuir la acidez del lodo y a su vez provocar la reacción de la totalidad de aluminio intercambiable según el resultado de la ecuación 10 es de 0.37 g de calcio.

$$1 \text{ g cal} \rightarrow 0.46 \text{ g Ca}^{2+}$$

$$X \leftarrow 0.37 \text{ g Ca}^{2+}$$

$$X = \frac{0.37 \text{ g Ca}^{2+} * 1 \text{ g cal}}{0.46 \text{ g Ca}^{2+}} = 0.8 \text{ g cal}$$

### 3.2.3.10 Cálculo de los gramos de cal para añadir al tanque de agitación.

Con el valor anterior llegamos a deducir que para 1000 ml de lodo tratado en el laboratorio son necesarios 0.8 g de cal, entonces se debe proyectar para los 19.46 m<sup>3</sup> de lodo que se almacenan en el tanque 2, de la siguiente manera:

$$19.46 \text{ m}^3 * \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} = 19460 \text{ l}$$

$$0.8 \text{ g cal} \rightarrow 1 \text{ l}$$

$$X \leftarrow 19460 \text{ l}$$

$$X = \frac{19460 \text{ l} * 0.8 \text{ g cal}}{1 \text{ l}} = 15568 \text{ g cal}$$

$$15568 \text{ g cal} * \frac{1 \text{ kg cal}}{1000 \text{ g de cal}} = 15.568 \text{ kg cal}$$

Para que se produzca una reacción completa es necesario añadir 15.6 kg de cal previo a agitación en el tanque 2.

### 3.2.4 Balance de masa

El tratamiento en el diseño propuesto se lo realiza cada dos días, se trata un volumen de 29.18 m<sup>3</sup> diarios, de los cuales en el espesamiento en el tanque 1 se genera 1/3 de lodos de este valor total, que expresado en kilogramos se tiene:

$$\rho_{\text{lodo}} = \frac{P}{V}$$

$$P_{\text{lodo}} = 990 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 29.18 \text{ m}^3$$

$$P_{\text{lodo}} = 28888.2 \text{ kg}(2 \text{ dias})$$

$$P_{\text{lodo}} = 57776.4 \text{ kg}$$

$$L_T = 57776.4 \text{ kg}$$

En el balance se plantea:



Entonces,

$$E = S$$

$$L_T = L_{es} + A_{s1}$$

El lodo total a tratar ( $L_T$ ) contiene una fracción de  $1/3$  de lodo espesado después del proceso, estableciendo la ecuación:

$$L_{es} = \frac{1}{3} L_T$$

$$L_{es} = \frac{1}{3} (57776.4) \text{ kg}$$

$$L_{es} = 19258.8 \text{ kg}$$

Resolviendo para  $A_{s1}$ , tenemos:

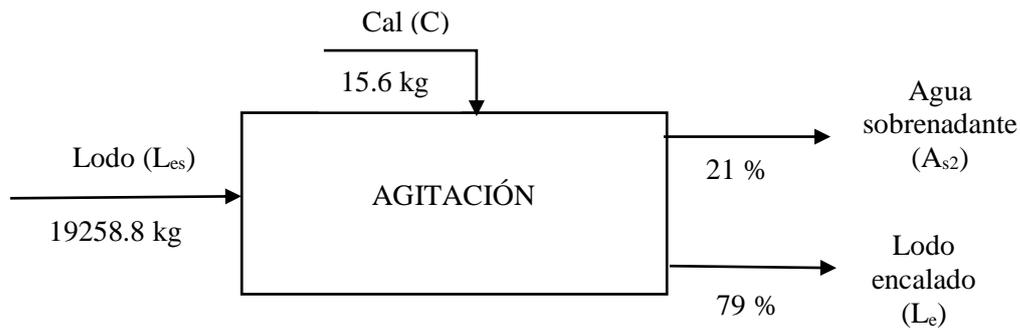
$$A_{s1} = L_T - L_{es}$$

$$A_{s1} = 57776.4 \text{ kg} - 19258.8 \text{ kg}$$

$$A_{s1} = 38517.6 \text{ kg}$$

El tratamiento en el tanque numero 2 dura alrededor de 24 horas, tiempo en el cual la cal se espera se someta a agitación con el lodo en el tiempo considerado prudente para eliminar posibles grumos generados.

Tomamos el valor de salida del tanque 1 de lodo espesado que es de 19258.8 kg que es la entrada del tanque 2, junto con la cantidad de cal calculada para tratar dicho volumen de lodos y con estos valores se tiene:



Las fracciones son 0.21 y 0.79 de agua sobrenadante y lodo encalado respectivamente, valores obtenidos en las pruebas de sedimentación de encalado.

$$E = S$$

$$L + C = A_{s2} + L_e$$

$$A_{s2} + L_e = 19258.8 \text{ kg} + 15.6 \text{ kg}$$

$$A_{s2} + L_e = 19274.4 \text{ kg}$$

El valor de  $L_e$  es el 79 % del total que ingresa ( $L+C$ ), entonces:

$$L_e = 0.79(L + C)$$

$$L_e = 0.79(19274.4 \text{ kg})$$

$$L_e = 15226.78 \text{ kg}$$

Reemplazamos el valor de  $L_e$  en la primera ecuación y se tiene:

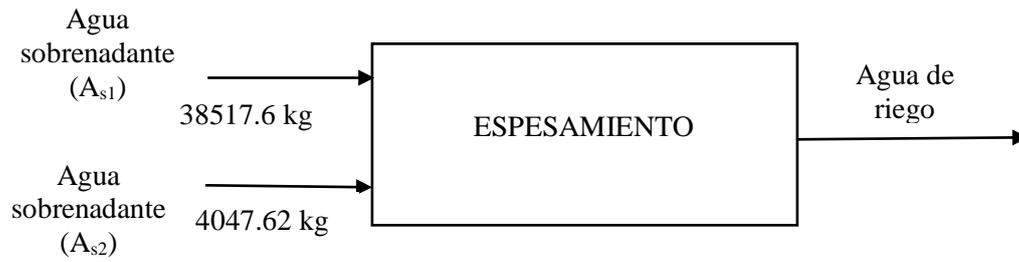
$$A_{s2} + L_e = 19274.4 \text{ kg}$$

$$A_{s2} + 15226.78 \text{ kg} = 19281 \text{ kg}$$

$$A_{s2} = 4047.62 \text{ kg}$$

Es necesario indicar que en este proceso al tener carbonato de calcio, en su disociación existe la liberación de  $\text{CO}_2$ , al ambiente, pero como es un porcentaje menor de calcita en comparación con el hidróxido de calcio que forman la cal, este valor es depreciable y no afecta en el balance final.

El tanque 3 basa su balance únicamente en agua sobrenadante de los dos tanques anteriores:



$$E = S$$

$$A_{s1} + A_{s2} = A_R$$

$$A_R = 38517.6 \text{ kg} + 4047.62 \text{ kg}$$

$$A_R = 42565.22 \text{ kg}$$

#### 3.2.4.1 Balance total de masa

$$E = S$$

$$L_T + C = L_e + A_R$$

$$L_T = 15226.78 \text{ kg} + 42565.22 \text{ kg} - 15.6 \text{ kg}$$

$$L_T = 57776.4 \text{ kg}$$

### 3.2.5 Dimensionamiento

El tratamiento requiere:

- ✓ Un tanque espesador de 30 m<sup>3</sup> que opera por gravedad durante un día antes de ser vaciadas sus dos fases.
- ✓ Un tanque agitador de 30 m<sup>3</sup> que recibe dos descargas de lodos durante un día, donde se realiza el encalado también durante 1 día.
- ✓ Un impulsor para el tanque de agitación.
- ✓ Cuatro deflectores para el tanque agitador.
- ✓ Un tanque recolector de agua de 45 m<sup>3</sup>, que recogerá agua sobrenadante de los procesos anteriores.
- ✓ Un tanque secador de gran capacidad para el tiempo de reacción del aluminio que será el tiempo de limpieza del mismo.

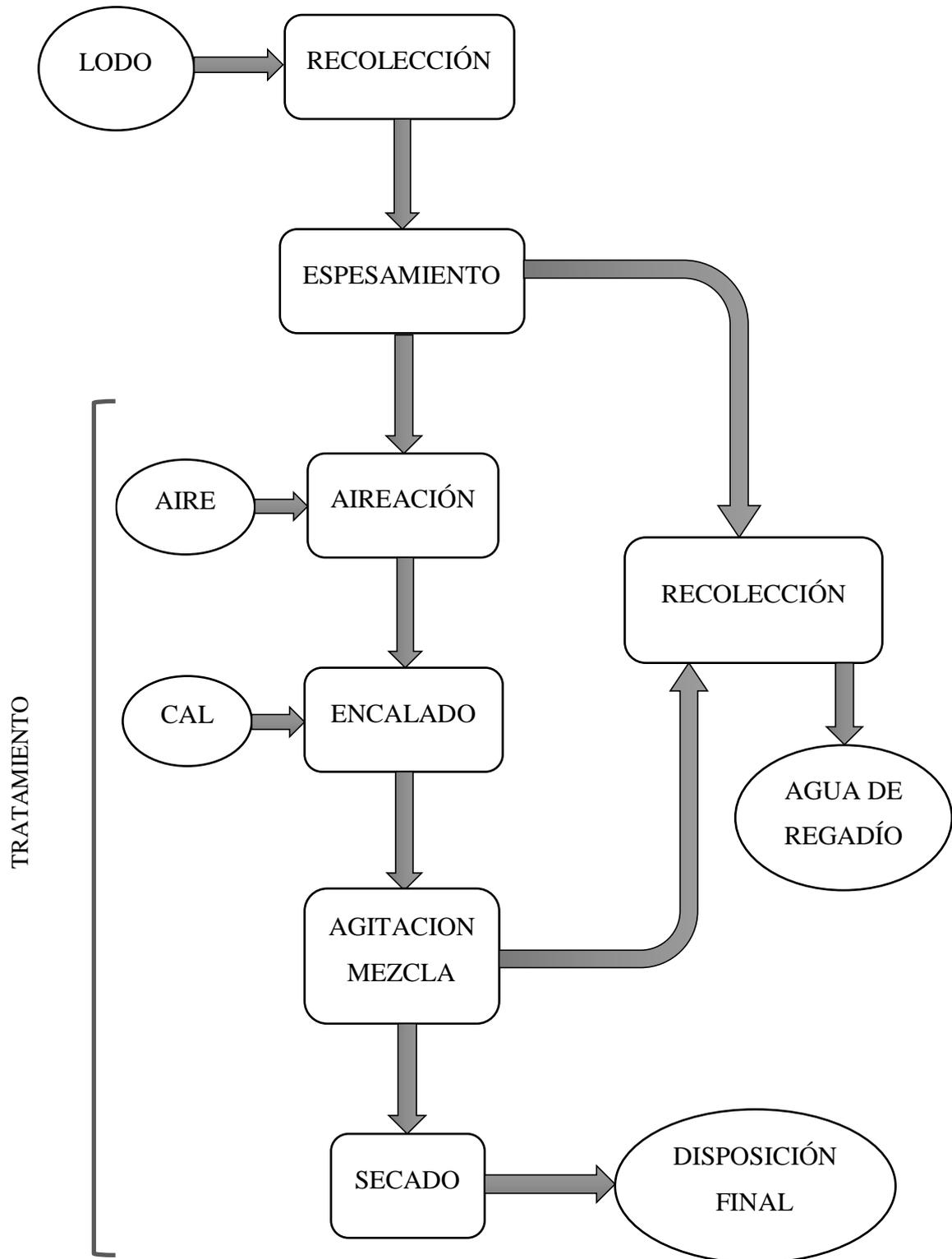
**Tabla 5-3:** Dimensiones del sistema de tratamiento

| TANQUE ESPESADOR  |       |                |
|-------------------|-------|----------------|
| PARAMETRO         | VALOR | UNIDAD         |
| Volumen           | 30    | m <sup>3</sup> |
| Diámetro          | 3.37  | m              |
| Altura            | 3.37  | m              |
| Altura de llave   | 1.09  | m              |
| TANQUE AGITADOR   |       |                |
| PARAMETRO         | VALOR | UNIDAD         |
| Volumen           | 20    | m <sup>3</sup> |
| Diámetro          | 2.94  | m              |
| Altura            | 2.94  | m              |
| Altura de llave   | 2.26  | m              |
| IMPULSOR          |       |                |
| Diámetro          | 0.98  | m              |
| Altura desde base | 0.98  | m              |
| Largo aspas       | 0.245 | m              |
| Ancho aspas       | 0.196 | m              |
| Potencia          | 1.34  | Hp             |

| DEFLECTORES                |       |                |
|----------------------------|-------|----------------|
| Ancho                      | 0.245 | m              |
| TANQUE CONTENEDOR          |       |                |
| PARAMETRO                  | VALOR | UNIDAD         |
| Volumen                    | 45    | m <sup>3</sup> |
| Diámetro                   | 3.86  | m              |
| Altura                     | 3.86  | m              |
| SECADOR                    |       |                |
| PARAMETRO                  | VALOR | UNIDAD         |
| Largo                      | 20    | m              |
| Ancho                      | 15    | m              |
| Profundidad                | 1     | m              |
| Volumen del área de secado | 277.5 | m <sup>3</sup> |
| Volumen rampa              | 22.5  | m <sup>3</sup> |
| Base rampa                 | 3     | m              |
| Altura rampa               | 1     | m              |
| Largo (profundidad) rampa  | 15    | m              |

Realizado por: Washington Arosteguí, 2017

### 3.3 Proceso de producción



**Gráfico 2-3:** Diagrama de proceso de tratamiento de lodos

Realizado por: Washington Arosteguí, 2017

### 3.4 Requerimientos de tecnología, equipos y maquinaria

#### 3.4.1 Materiales y especificaciones.

**Tabla 6-3:** Materiales de construcción y especificaciones

| Nombre                                     | Característica   | Otras especificaciones |
|--|------------------|------------------------|
| Base (Tanques)                             | 30 cm de espesor | Hormigón Armado        |
| Muro (Tanques)                             | 20 cm de espesor | Hormigón Armado        |
| Tubería (Transporte de lodo)               | 10 pulgadas      | Acero negro            |
| Accesorios (Conducción de lodo, codos 90°) | 10 pulgadas      | Acero negro            |
| Válvula de compuerta                       | 10 pulgadas      | De Metal               |
| Agitador                                   | 1.96 m × 0.98 m  | Acero Inoxidable       |
| Motor de agitador                          | 1.34 Hp          | Trifásico              |

Realizado por: Washington Arostegui, 2017

### 3.5 Análisis de costo/ beneficio del proyecto

#### 3.5.1 Gastos de inversión

Los gastos de inversión basan su cálculo en la estimación de la construcción de los tanques componentes del tratamiento y todas las tuberías y accesorios utilizados para su transporte, de la siguiente manera:

##### 3.5.1.1 Gastos de construcción

Tomamos en cuenta las capacidades de los tanques y secador:

- ✓ Tres tanques de 30, 20 y 45 m<sup>3</sup>, respectivamente, con una media losa en el de 20 m<sup>3</sup>.
- ✓ Un secador de 300 m<sup>3</sup>

En total 395 m<sup>3</sup> de construcción.

**Tabla 7-3:** Costo de construcción de losas base

| <b>LOSA BASE</b>  |                 |                |                               |                          |
|---|-----------------|----------------|-------------------------------|--------------------------|
| <b>ACTIVIDAD</b>  | <b>CANTIDAD</b> | <b>UNIDAD</b>  | <b>PRECIO POR UNIDAD (\$)</b> | <b>PRECIO TOTAL (\$)</b> |
| Excavación  | 278             | m <sup>3</sup> | 5.00                          | 1 390.00                 |
| Aplanamiento y nivelación                                 | 288.17          | m <sup>2</sup> | 3.50                          | 1 008.60                 |
| Empedrado de fondo  | 288.17          | m <sup>2</sup> | 8.00                          | 2 305.36                 |
| Replanteo de hormigón, fc=180 kg/cm <sup>2</sup> , e=3 cm | 8.64            | m <sup>3</sup> | 115.00                        | 993.6                    |
| Hormigón simple, fc=210 kg/cm <sup>2</sup>                | 25.92           | m <sup>3</sup> | 130.00                        | 3 369.60                 |
| Acero estructural   | 1000            | kg             | 1.70                          | 1 700.00                 |
| Enlucido piso, impermeabilizado y pintura                 | 288.17          | m <sup>2</sup> | 8.00                          | 2 305.36                 |
|   |                 |                | <b>TOTAL</b>                  | <b>\$ 13 072.52</b>      |

Realizado por: Washington Arosteguí, 2017

**Tabla 8-3:** Costo de construcción de paredes

| <b>PAREDES</b>                                |                 |                |                               |                          |
|---|-----------------|----------------|-------------------------------|--------------------------|
| <b>ACTIVIDAD</b>                              | <b>CANTIDAD</b> | <b>UNIDAD</b>  | <b>PRECIO POR UNIDAD (\$)</b> | <b>PRECIO TOTAL (\$)</b> |
| Acero estructural                             | 4500            | kg             | 1.70                          | 7 650.00                 |
| Acero corrugado, 12 mm                        | 1               | quintal        | 50.99                         | 50.99                    |
| Hormigón simple, fc= 210 kg/cm <sup>2</sup>   | 38.45           | m <sup>3</sup> | 130.00                        | 4 998.50                 |
| Encofrado                                     | 192.26          | m <sup>2</sup> | 7.00                          | 1 345.82                 |
| Champeado mortero 1:2 espesor: 2 cm           | 3.84            | m <sup>3</sup> | 4.00                          | 15.36                    |
| Enlucido interior, impermeabilizado y pintura | 192.26          | m <sup>2</sup> | 8.50                          | 1 634.21                 |
|   |                 |                | <b>TOTAL</b>                  | <b>\$ 15 694.88</b>      |

Realizado por: Washington Arosteguí, 2017

**Tabla 9-3:** Costo de construcción de cubierta

| <b>CUBIERTA</b>                                |                 |                |                               |                          |
|--|-----------------|----------------|-------------------------------|--------------------------|
| <b>ACTIVIDAD</b>                               | <b>CANTIDAD</b> | <b>UNIDAD</b>  | <b>PRECIO POR UNIDAD (\$)</b> | <b>PRECIO TOTAL (\$)</b> |
| Acero corrugado,<br>12mm                       | 1               | quintal        | 50.99                         | 50.99                    |
| Hormigón simple,<br>fc= 210 kg/cm <sup>2</sup> | 0.5             | m <sup>3</sup> | 130.00                        | 65.00                    |
| Acero corrugado, 8<br>mm                       | 1/2             | quintal        | 49.99                         | 24.99                    |
| Encofrado                                      | 3.39            | m <sup>2</sup> | 10.00                         | 33.9                     |
| Masillado vigas y<br>losa                      | 3.39            | m <sup>2</sup> | 7.00                          | 23.73                    |
| Pintura para sol e<br>impermeabilizado         | 3.39            | m <sup>2</sup> | 3.90                          | 13.22                    |
|  |                 |                | <b>TOTAL</b>                  | <b>\$ 211. 83</b>        |

Realizado por Washington Arosteguí, 2017

**Tabla 10-3:** Costo de accesorios y tuberías

| <b>ACCESORIOS, TUBERIAS, AGITADOR Y MOTOR</b> |                 |                               |                          |
|---|-----------------|-------------------------------|--------------------------|
| <b>ACTIVIDAD</b>                              | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO POR UNIDAD (\$)</b> | <b>PRECIO TOTAL (\$)</b> |
| Tubería de acero<br>negro 10''                | 6               | 174.99                        | 1 049.94                 |
| Codo 90 <sup>0</sup>                          | 2               | 98.99                         | 197.98                   |
| Válvula de<br>compuerta                       | 5               | 310.20                        | 1 551.00                 |
| Soporte de agitador<br>y motor                | 1               | 150.00                        | 150.00                   |
| Agitador vertical de<br>4 palas.              | 1               | 927.30                        | 927.30                   |
| Motor trifásico                               | 1               | 750.00                        | 750.00                   |
|   |                 | <b>TOTAL</b>                  | <b>\$ 4 626.22</b>       |

Realizado por: Washington Arosteguí, 2017

### 3.5.1.2 Gastos de instalaciones

**Tabla 11-3:** Costos de instalaciones

| INSTALACIONES |                 |
|---------------|-----------------|
| Eléctrica     | \$ 2 000        |
| Hidráulica    | \$ 1 000        |
| Mano de obra  | \$ 5 500        |
| <b>TOTAL</b>  | <b>\$ 8 500</b> |

Realizado por: Washington Arosteguí, 2017

### 3.5.1.3 Gasto total de inversión

**Tabla 12-3:** Gasto total de inversión en construcción e instalaciones

|                         |                      |                     |
|-------------------------|----------------------|---------------------|
| Gastos de construcción  | Losa de fondo        | \$ 13 072.52        |
|                         | Paredes              | \$ 15 694.88        |
|                         | Cubierta             | \$ 211. 83          |
|                         | Accesorios y tubería | \$ 4 626.22         |
| Gastos de instalaciones |                      | \$ 8 500            |
| <b>TOTAL INVERSION</b>  |                      | <b>\$ 42 105.45</b> |

Realizado por Washington Arosteguí, 2017

## 3.5.2 Gastos de operación

### 3.5.2.1 Costo de cal

Para seleccionar la cal más eficiente calculamos el costo por unidad de PRNT (Espinosa & Molina, 1999), una cal de 25% de PRNT es la mitad de efectiva que una de 50%, en el caso de la cal utilizada para el tratamiento del lodos de la PTAP regional Yanahurco posee un PRNT de 70% y un costo de 23 dólares por saco de 25 kg, es decir:

$$\text{Costo por Unidad de PRNT} = \frac{\text{Costo por saco de material}}{\text{PRNT del Material}}$$

$$\text{Costo por Unidad de PRNT} = \frac{23 \text{ dólares}}{70\%} = \frac{23 \text{ dólares}}{0.7}$$

$$\text{Costo por Unidad de PRNT} = 32.86 \text{ dólares}$$

El costo real de un saco de acuerdo a su efectividad es de 32.86 dólares, en comparación con una cal de un PRNT bajo (50%) aunque sea barata resulta ser más cara:

$$\text{Costo por Unidad de PRNT} = \frac{\text{Costo por saco de material}}{\text{PRNT del Material}}$$

$$\text{Costo por Unidad de PRNT} = \frac{20 \text{ dólares}}{50\%} = \frac{20 \text{ dólares}}{0.5}$$

$$\text{Costo por Unidad de PRNT} = 40 \text{ dólares}$$

**Tabla 13-3:** Costo mensual de cal

| Material de Encalado                             | Dosis (2 días)(kg) | Dosis (mensual)(kg) | Costo/saco (25kg)(\$) | Costo/kg (\$) |
|--|--------------------|---------------------|-----------------------|---------------|
| Cal<br>[Ca <sub>2</sub> (OH)+CaCO <sub>3</sub> ] | 15.6               | 234                 | 23                    | 0.92          |
|  |                    |                     | Costo (2 días)        | \$ 14.35      |
|  |                    |                     | Costo mensual         | \$ 215.25     |

Realizado por: Washington Arosteguí, 2017

### 3.5.2.2 Otros costos de operación

**Tabla 14-3:** Otros costos de operación

| Costos de Operación     | Costos anual | Costo mensual |
|-------------------------|--------------|---------------|
| Mantenimiento           | \$ 700       | \$ 58.3       |
| Mano de Obra (Operador) | -            | \$ 550        |
| Servicios básicos       | -            | \$ 55         |

Realizado por: Washington Arosteguí, 2017

La totalidad de gastos de operación es:

**Tabla 15-3:** Total de gastos de operación

| Costos de operación                                       | Costo mensual   |
|---|-----------------|
| Cantidad de Cal [Ca <sub>2</sub> (OH)+CaCO <sub>3</sub> ] | \$ 215.3        |
| Mantenimiento   | \$ 58.3         |
| Mano de Obra (Operador)                                   | \$ 550          |
| Servicios básicos   | \$ 55           |
| <b>TOTAL</b>  | <b>\$ 878.6</b> |

Realizado por: Washington Arosteguí, 2017

### 3.5.3 Gasto total

Se toma en cuenta los gastos de inversión y de operación; más un porcentaje de 5% como máximo, del total de los dos parámetros para gastos imprevistos. (Cerón, 2016)

**Tabla 16-3:** Gasto total de implementación del tratamiento

| <b>GASTO TOTAL</b>  |                     |
|---------------------|---------------------|
| Gastos de inversión | \$ 42 105.45        |
| Gastos de operación | \$ 878.6            |
| Imprevistos         | \$ 2 142.19         |
| <b>TOTAL</b>        | <b>\$ 45 126.24</b> |

Realizado por: Washington Arosteguí, 2017

### 3.5.4 Análisis financiero

El análisis financiero se aplica principalmente a proyectos diseñados para generar ingresos. (FAO, 2007). El presente proyecto, cumple con todas las características de un proyecto de inversión, por lo que al tomar esta denominación el mismo no está destinado a generar ingresos, razón por la cual su sostenibilidad no dependerá de una generación de sus propios recursos, sino de la inversión de capital de entidades a cargo de la PTAP regional Yanahurco.

El indicador más importante para conocer la influencia del proyecto en la comunidad, es el aporte de éste al erario nacional y al sector (provincia). Se toma en cuenta además, el presupuesto destinado para alcantarillado y agua potable del sector, puesto que éste es el área en donde el proyecto tiene mayor influencia.

✓ *Aporte del proyecto en relación al presupuesto 2018 de la provincia de Tungurahua*

$$Aporte = \frac{\text{Costo del proyecto} * 100\%}{\text{Presupuesto}_{\text{anual}}}$$

$$Aporte = \frac{45\ 126.24 * 100\%}{63\ 000\ 000}$$

$$Aporte = 0.072\%$$

- ✓ *Aporte del proyecto en relación al presupuesto 2018 de la provincia de Tungurahua para agua y alcantarillado (20% del presupuesto anual)*

$$Aporte = \frac{Costo\ del\ proyecto * 100\%}{Presupuesto_{anual} * 0.2}$$

$$Aporte = \frac{45\ 126.24 * 100\%}{63\ 000\ 000 * 0.2}$$

$$Aporte = 0.36\%$$

- ✓ *Aporte del proyecto en relación al PIB (Producto interno bruto) de la República del Ecuador*

$$Aporte = \frac{Costo\ del\ proyecto * 100\%}{PIB}$$

$$Aporte = \frac{45\ 126.24 * 100\%}{189\ 000\ 000\ 000}$$

$$Aporte = 0.0000238\%$$

El aporte más significativo del proyecto va dirigido para el servicio de agua potable y alcantarillado de la provincia en un 0.36%, a diferencia del bajo beneficio al PIB (Producto Interno Bruto) del estado, mismo que compensa su validez en el área social, asociando beneficios en la productividad agrícola, salud humana y el ambiente.

### **3.6 Resultados**

Se analizaron los lodos previos al enclado en tres parámetros: químicos, físicos y microbiológicos, los cuales arrojaron tres parámetros con valores que de acuerdo a Mujeriego, 1991, no son recomendables para su liberación al ecosistema, éstos son: pH, aluminio y hierro. En cuanto a la NOM-004-SEMARNAT-2002.- Norma oficial mexicana protección ambiental-lodos y biosólidos, no toma en cuenta tales parámetros ni a los metales mencionados para los cuales se diseñó el proceso de tratamiento.

### 3.6.1 Parámetros analizados- parámetros químicos

**Tabla 17-3:** Análisis-parámetros químicos

| Parámetros | Día 1<br>(mg/kg) | Día 2<br>(mg/kg) | Día 3<br>(mg/kg) | Compuesta<br>(mg/kg) | Valor de referencia<br>(NOM004) (mg/kg) |        |
|------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|---|--------|
|            |                  |                  |                  |                      | Excelentes                              | Buenos |
| Cadmio     | 0.01             | -                | -                | < 0.0001             | 39                                      | 85     |
| Cromo      | 1.45             | -                | -                | 1.18                 | 1200                                    | 3000   |
| Cobre      | 8.94             | 8.70             | -                | 7.43                 | 1500                                    | 4300   |
| Níquel     | 0.03             | -                | -                | 0.67                 | 420                                     | 420    |
| Zinc       | 0.02             | -                | -                | 0.049                | 2800                                    | 7500   |
| Aluminio   | 52.16            | 17.05            | 102.1            | 39.88                | -                                       | -      |
| Hierro     | 64.23            | 104              | 127              | 84.66                | -                                       | -      |

**Fuente:** Laboratorio de Aguas residuales ESPOCH y Laboratorio de Servicios Ambientales UNACH, acreditado por la OAE con acreditación N° OAE LE C 12-006

**Realizado por:** Washington Arosteguí, 2017

### 3.6.2 Parámetros analizados- parámetros físicos

**Tabla 18-3:** Análisis- parámetros físicos

| Parámetros          | Día 1 | Día 2 | Día 3 | Compuesta | Unidades          |
|---------------------|-------|-------|-------|-----------|-------------------|
| pH                  | 6.87  | 6.4   | 6.2   | 5.63      | -                 |
| Conductividad       | 342   | 350   | 260   | 306       | us/cm             |
| Sólidos suspendidos | 625   | 505   | -     | 1225      | mg/l              |
| Materia orgánica    | 55    | -     | -     | 68.45     | %                 |
| Densidad            | 0.99  | 0.98  | -     | 0.99      | g/cm <sup>3</sup> |
| Humedad             | 99.56 | -     | -     | 95.70     | %                 |
| Temperatura         | 18.1  | 19    | 15    | -         | °C                |

**Fuente:** Laboratorio de Servicios Ambientales UNACH, acreditado por la OAE con acreditación N° OAE LE C 12-006

**Realizado por:** Washington Arosteguí, 2017

### 3.6.3 Parámetros microbiológicos.

**Tabla 19-3:** Análisis microbiológicos

| Parámetro          | Unidades   | Valor                 | Valor de referencia (NOM004) |                 |                    |
|--------------------|------------|-----------------------|------------------------------|-----------------|--------------------|
|                    |            |                       | Excelente                    | Bueno/Excelente | Buenos             |
| Coliformes fecales | NMP/100 ml | < 2<br>(Ausencia)     | < 1000                       | < 1000          | <2x10 <sup>6</sup> |
| Parásitos          | NMP/100 ml | < 0.001<br>(Ausencia) | < 1                          | < 10            | < 35               |
| Salmonella spp     | NMP/100 ml | 0                     | < 3                          | < 3             | < 300              |

**Fuente:** Laboratorio de Servicios Ambientales UNACH, acreditado por la OAE con acreditación N° OAE LE C 12-006  
**Realizado por:** Washington Arosteguí, 2017

Los cambios de valores de pH, aluminio y hierro, después del encalado, se muestran a continuación:

**Tabla 20-3:** Resultados del tratamiento- parámetros físicos, pH

| Muestra (N) | Sin tratamiento | Tratamiento (un día) | Tratamiento (un mes) | Tratamiento (6 meses) |
|-------------|-----------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| 1           | 5.63            | 7.24                 | 7.21                 | -                     |
| 2           | 5.63            | 7.62                 | 7.04                 | 6.80                  |
| 3           | 5.63            | 8.20                 | 7.10                 | -                     |
| 4           | 5.63            | 8.89                 | 7.52                 | -                     |
| 5           | 5.63            | 10.30                | 8.51                 | -                     |
| 6           | 5.63            | 10.84                | 10.40                | -                     |

**Fuente:** Laboratorio de Servicios Ambientales UNACH, acreditado por la OAE con acreditación N° OAE LE C 12-006  
**Realizado por:** Washington Arosteguí, 2017

|  |                         |
|--|-------------------------|
|  | Concentración calculada |
|--|-------------------------|

Después de la aireación y el encalado por un tiempo de seis meses los resultados arrojaron una disminución en los valores de aluminio y hierro, consiguiendo así los resultados esperados con el tratamiento; dividiéndolos en tres análisis en el lapso de tiempo estimado.

**Tabla 21-3:** Resultados del tratamiento- parámetros químicos aluminio y hierro

| N | Sin tratamiento<br>(mg/kg) |       | Primer análisis<br>(mg/kg) |      | Segundo análisis<br>(mg/kg) |       | Tercer análisis<br>(mg/kg) |       |
|---|----------------------------|-------|----------------------------|------|-----------------------------|-------|----------------------------|-------|
|   | Al                         | Fe    | Al                         | Fe   | Al                          | Fe    | Al                         | Fe    |
| 1 | 39.88                      | 84.66 | 30.2                       | 50.1 | 24.00                       | 34.95 | -                          | -     |
| 2 | 39.88                      | 84.66 | 30.3                       | 62.2 | 21.81                       | 15.53 | 13.20                      | 10.97 |
| 3 | 39.88                      | 84.66 | 29.2                       | 52.3 | 22.21                       | 41.75 | -                          | -     |
| 4 | 39.88                      | 84.66 | 27.6                       | 45.4 | 20.73                       | 28.16 | -                          | -     |
| 5 | 39.88                      | 84.66 | 23.7                       | 40.4 | 19.26                       | 37.86 | -                          | -     |
| 6 | 39.88                      | 84.66 | 23.6                       | 39.3 | 16.72                       | 37.86 | -                          | -     |

**Fuente:** Laboratorio de Servicios Ambientales UNACH, acreditado por la OAE con acreditación N° OAE LE C 12-006

**Realizado por:** Washington Arosteguí, 2017

|  |                         |
|--|-------------------------|
|  | Concentración calculada |
|--|-------------------------|

Con los resultados obtenidos, establecemos las variables del proceso de tratamiento, que se componen por:

- ✓ La dosificación de cal en cada muestra
- ✓ Variación de pH
- ✓ Variación de aluminio
- ✓ Variación de hierro

También se debe hacer una mención especial al tiempo de reacción de la cal, aunque ésta es independiente de las demás y no influye en la dosificación de cal, más sí tiene importancia en el diseño de las operaciones de tratamiento.

De las cuatro variables indicadas en un inicio se identifican como parámetros de riesgo o variables de riesgo al pH, aluminio y hierro, en las cuales se basa el diseño base del tratamiento en general (ver anexo I).

### 3.7 Análisis de resultados

#### 3.7.1 Variación de los parámetros de riesgo en cada muestra.

Los análisis realizados un día posterior al encalado arrojaron resultados más bajos de concentración que antes del encalado.

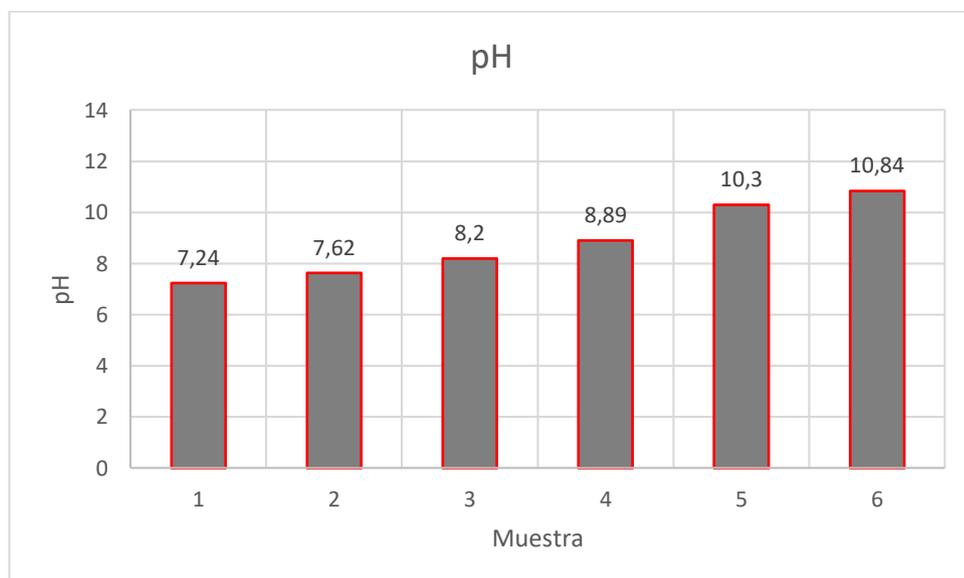
**Tabla 22-3:** Resultados del análisis después del encalado

| Muestra | pH    | Aluminio (mg/kg) | Hierro (mg/kg) |
|---------|-------|------------------|----------------|
| 1       | 7.24  | 30.2             | 50.1           |
| 2       | 7.62  | 30.3             | 62.2           |
| 3       | 8.20  | 29.2             | 52.3           |
| 4       | 8.89  | 27.6             | 45.4           |
| 5       | 10.30 | 23.7             | 40.4           |
| 6       | 10.84 | 23.6             | 39.3           |

**Fuente:** Laboratorio de Aguas residuales ESPOCH

**Realizado por:** Washington Arosteguí, 2017

Gráficamente el pH varía de muestra en muestra como se indica a continuación:

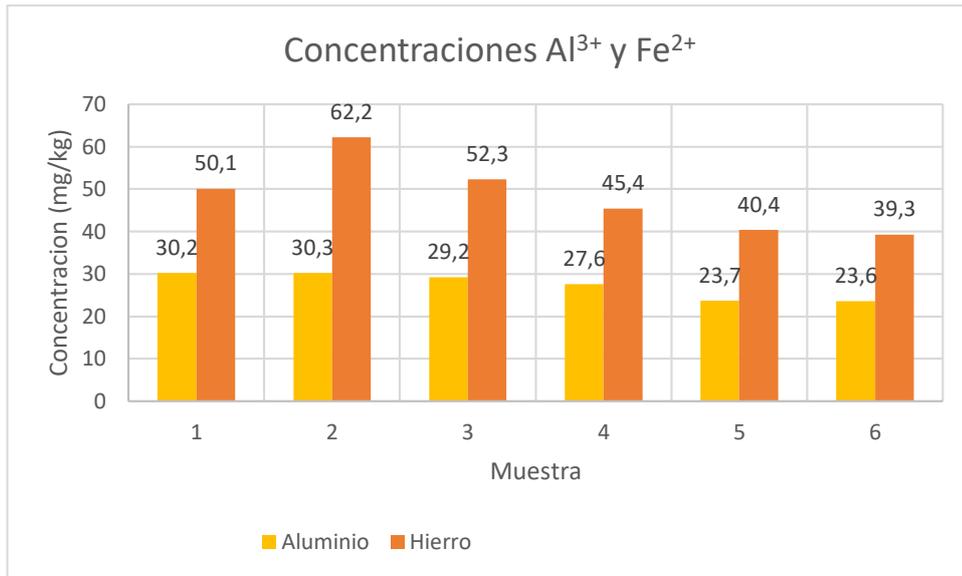


**Gráfico 3-3:** Valor de pH el primer día de encalado

**Realizado por:** Washington Arosteguí, 2017

El pH aumenta a medida que la concentración de cal aumenta, lo cual es de esperar sabiendo el proceso de disociación iónica, generación de iones hidroxilos y bases en el lodo.

En cuanto a las concentraciones de Aluminio y Hierro se tiene:



**Gráfico 4-3:** Concentración de aluminio y hierro el primer día de encalado

Realizado por: Washington Arosteguí, 2017

Las concentraciones de aluminio y hierro de igual forma varían, a medida que las concentraciones de cal varían, pero en el efecto contrario, es decir disminuye sus concentraciones a medida que la cantidad de cal es mayor, aunque no es una gran diferencia.

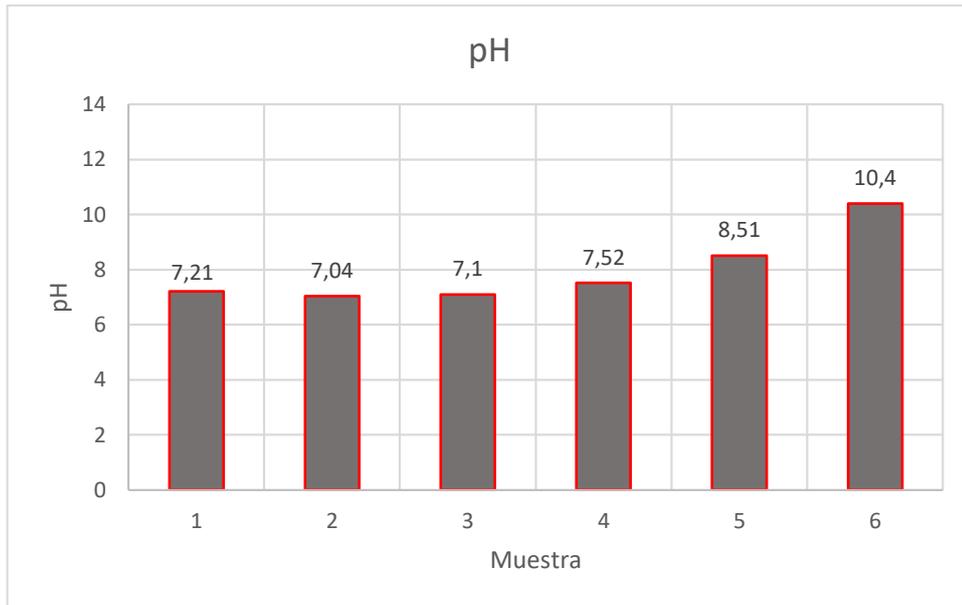
Después de un mes los resultados indican un descenso en las concentraciones, aunque el pH se tiende a mantener:

**Tabla 23-3:** Resultados del análisis a un mes del encalado

| Muestra | pH    | Aluminio (mg/kg) | Hierro (mg/kg) |
|---------|-------|------------------|----------------|
| 1       | 7.21  | 24.00            | 34.95          |
| 2       | 7.04  | 21.81            | 15.53          |
| 3       | 7.10  | 22.21            | 41.75          |
| 4       | 7.52  | 20.73            | 28.16          |
| 5       | 8.51  | 19.26            | 37.86          |
| 6       | 10.40 | 16.72            | 37.86          |

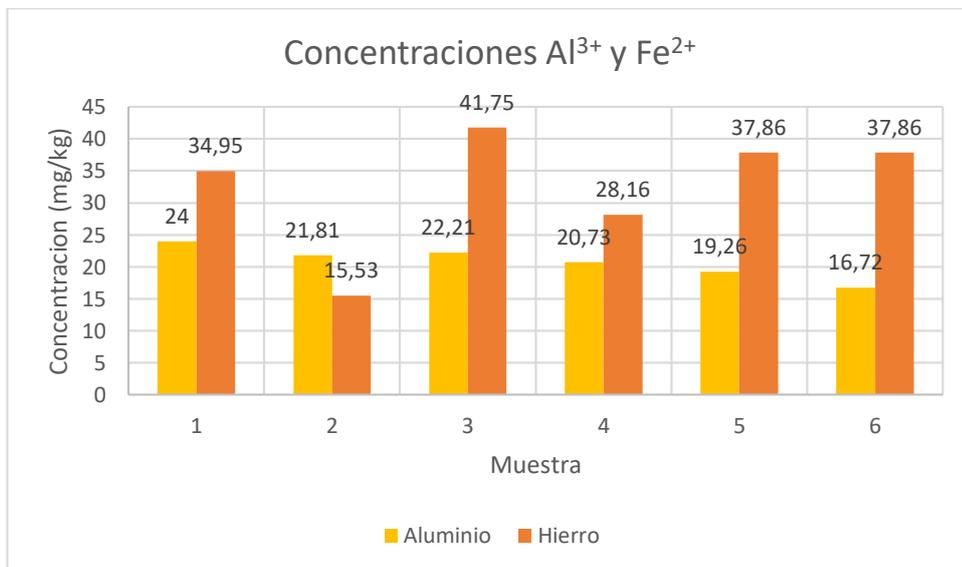
Fuente: Laboratorio de Servicios Ambientales UNACH, acreditado por la OAE con acreditación N° OAE LE C 12-006  
Realizado por: Washington Arosteguí, 2017

Gráficamente el pH después de un mes se muestra a continuación:



**Gráfico 5-3:** Valor de pH después de un mes de encalado  
**Realizado por:** Washington Arosteguí, 2017

Gráficamente las concentraciones de aluminio y hierro después de un mes indican:



**Gráfico 6-3:** Concentración de Al y Fe después de un mes de encalado  
**Realizado por:** Washington Arosteguí, 2017

El valor de menor variación con el encalado es la del hierro, posiblemente se debe a que en la aireación se oxidó completamente todo el hierro que se encontraba disuelto, y formó compuestos insolubles antes del encalado.

### 3.7.1.1 Variación de los parámetros de riesgo respecto al tiempo

Después de seis meses de reacción de encalado se tiene los resultados únicamente con la muestra que bajo su cantidad de aluminio, que es la misma calculada teóricamente, siendo éste un indicio que el cálculo es el correcto.

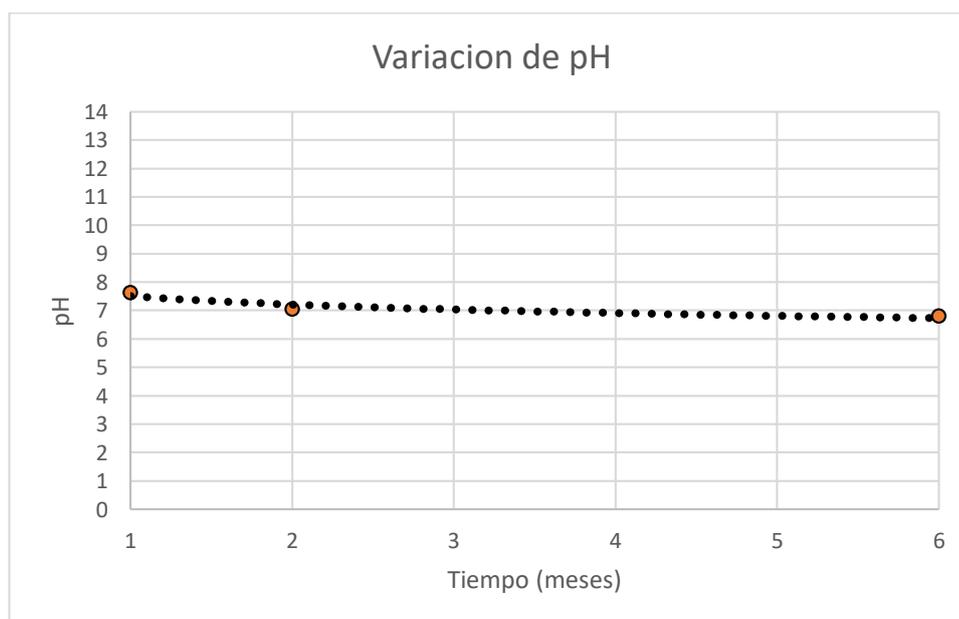
**Tabla 24-3:** Resultado del análisis a seis meses del encalado (muestra 2)

| Muestra | pH   | Aluminio (mg/kg) | Hierro (mg/kg) |
|---------|------|------------------|----------------|
| 2       | 6.80 | 13.20            | 10.97          |

**Fuente:** Laboratorio de Servicios Ambientales UNACH, acreditado por la OAE con acreditación N° OAE LE C 12-006

**Realizado por:** Washington Arosteguí, 2017

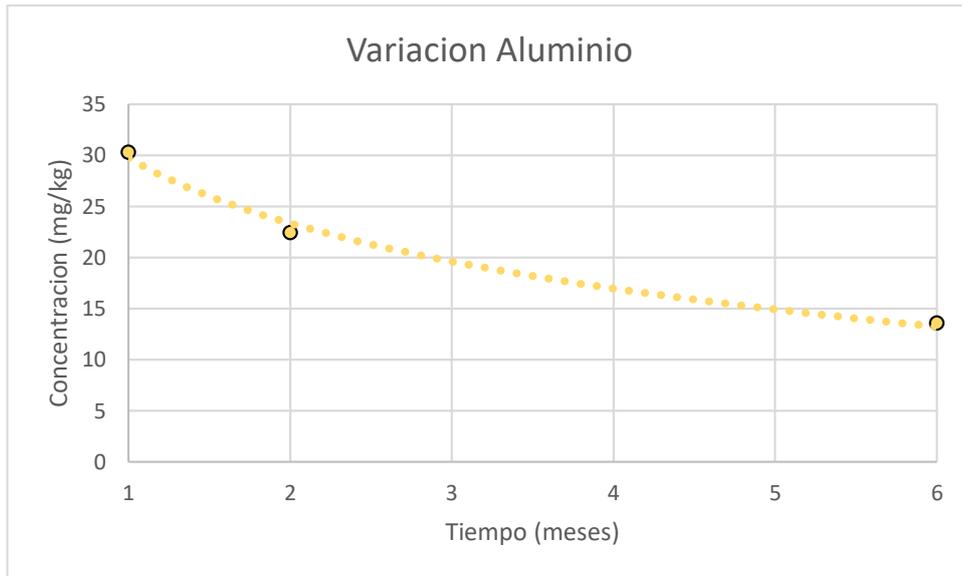
Representando gráficamente los resultados de la muestra 2 que indica la variación más significativa se ve una tendencia de las concentraciones y pH en el análisis.



**Gráfico 7-3:** pH vs tiempo

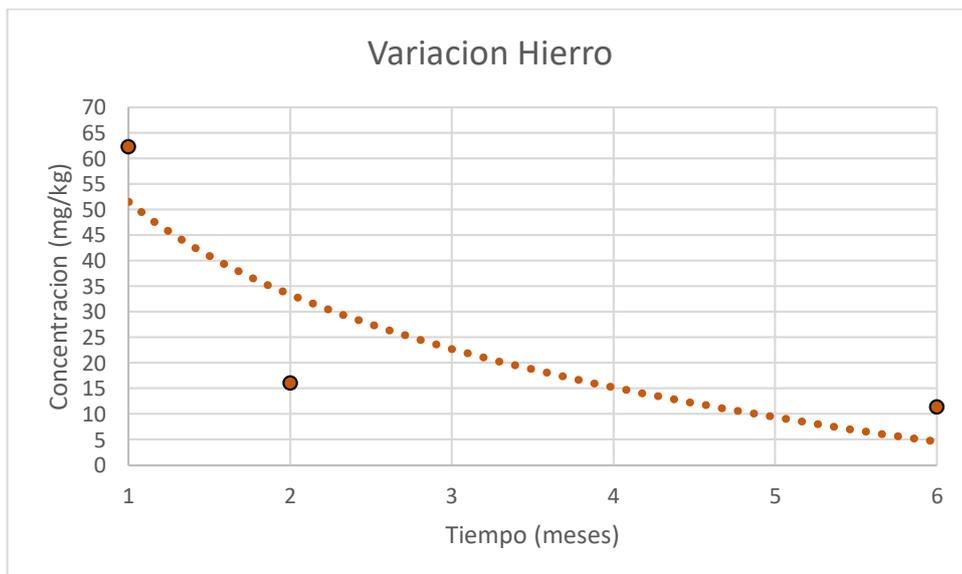
**Realizado por:** Washington Arosteguí, 2017

No existe una variación notoria del valor de pH a lo largo de los seis meses de encalado, la variación más visible se da de 7.62 a 7.04, variando alrededor de 0.58 puntos de diferencia en el primer mes, comparado con los 0.24 puntos que disminuye en los cinco meses siguientes, deduciendo que en el primer mes de reacción ocurre el cambio más significativo de pH.



**Gráfico 8-3:** Concentración de aluminio vs tiempo  
**Fuente:** Realizado por Washington Arosteguí, 2017

En cuanto al aluminio, razón primordial del tratamiento, la variación es mucho más significativa en sus valores de concentración. Disminuyendo continuamente desde el primer día de encalado alrededor de 8 puntos en el primer mes, y casi 9 puntos en los meses siguientes, reduciendo el valor original de la muestra sin tratar desde 39.88 mg/kg hasta 13.2 mg/kg en los seis primeros meses de encalado.



**Gráfico 9-3:** Concentración de hierro vs tiempo  
**Realizado por:** Washington Arosteguí, 2017

De los parámetros tomados en cuenta, el hierro es el que más variación presenta en el tratamiento, mostrando una variación enorme en el primer mes hasta reducirse a los 15.53 mg/kg, tendencia que en los próximos cinco meses no presenta variación similar, sin embargo llega en un valor bajo de 10.97 mg/kg.

Es importante mencionar que todos los valores tienen tendencia a continuar disminuyendo por lo que es recomendable prolongar el tiempo de permanencia de los lodos durante seis meses más en el secador.

### **3.7.2 *Análisis de correlación de las variables***

Las variables denotan una disminución de sus valores, validando con ello el tratamiento aplicado, esta variación puede o no tener relación entre sí mismas y para saber cuánto influye una sobre otra aplicamos una correlación de Pearson entre cada una; es decir entre cantidad de cal añadida pH, variación de aluminio y variación de hierro.

Sabemos que con excepción de la dosificación de cal todas varían de acuerdo al tiempo, pero el tiempo no varía de acuerdo a ellas, con lo que tenemos en claro que todas éstas son variables dependientes y que el tiempo es una variable independiente. Entonces la correlación nos permitirá saber el grado de dependencia de una y otra para así saber que variables controlar en el proceso de tratamiento.

El grado de correlación se resume en la siguiente tabla con los datos del segundo análisis, el cuál es el último realizado a todas las muestras:

**Tabla 25-3:** Análisis de correlativo de variables

|                        |                        | <b>Dosis de Cal</b> | <b>Variación de pH</b> | <b>Variación de Al</b> | <b>Variación de Fe</b> |
|------------------------|------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Dosis de Cal</b>    | Correlación de Pearson | 1                   | ,992**                 | -,957**                | ,382                   |
|                        | Sig. (bilateral)       |                     | ,000                   | ,003                   | ,454                   |
|                        | N                      | 6                   | 6                      | 6                      | 6                      |
| <b>Variación de pH</b> | Correlación de Pearson | ,992**              | 1                      | -,919**                | ,380                   |
|                        | Sig. (bilateral)       | ,000                |                        | ,010                   | ,458                   |
|                        | N                      | 6                   | 6                      | 6                      | 6                      |
| <b>Variación de Al</b> | Correlación de Pearson | -,957**             | -,919**                | 1                      | -,214                  |
|                        | Sig. (bilateral)       | ,003                | ,010                   |                        | ,684                   |
|                        | N                      | 6                   | 6                      | 6                      | 6                      |
| <b>Variación de Fe</b> | Correlación de Pearson | ,382                | ,380                   | -,214                  | 1                      |
|                        | Sig. (bilateral)       | ,454                | ,458                   | ,684                   |                        |
|                        | N                      | 6                   | 6                      | 6                      | 6                      |

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01

Realizado por: Washington Arosteguí, 2017

Existe una alta correlación entre la dosificación de cal con la variación de pH y aluminio, mas no así con la variación de hierro, lo que indica que el tratamiento con cal no es eficiente para dicho metal, razón por la cual la aireación fue el factor determinante en su disminución.

Con ello establecemos que la dosificación de cal y la variación de pH son directamente proporcionales entre sí, e inversamente proporcionales a la variación de aluminio que se determina por el signo negativo, sin tener dependencia con la variación de hierro que varía de acuerdo a otros factores.

Todos los análisis correlativos son realizados en el nivel 0.01, que significa un mínimo margen de error con valores altos de correlación.

### 3.8 Conclusiones

- ✓ Se realizó un análisis, físico, químico y microbiológico del lodo generado en la planta de tratamiento regional Yanahurco, y de acuerdo a la norma oficial mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002.-PROTECCIÓN AMBIENTAL- LODOS Y BIOSÓLIDOS-) todos los parámetros de metales pesados y microorganismos se encuentran dentro de límites permisibles, sin embargo se notó el poco alcance de la norma al no incluir valores de otros metales como el aluminio intercambiable y hierro producidos en tratamientos de agua potable, donde aparecen por la adición de coagulantes como el policloruro de aluminio (PAC) y que según Rafael Mujeriego en su manual de riego con agua residual regenerada estos valores se encuentran en exceso en la PTAP regional Yanahurco.
- ✓ Se estableció como base para el diseño de un tratamiento de encalado la cantidad de aluminio y hierro presentes en el lodo, con valores de 39.88 mg/kg y 84.66 mg/kg respectivamente, el valor del pH de 5.63 como indicador de un lodo ácido. El volumen total de lodo que produce la planta de 29.18 m<sup>3</sup> de lodo cada día, no se expresa como flujo volumétrico debido a que la descarga de lodos en la PTAP regional Yanahurco es un proceso estacionario, y al final se cuenta la cantidad total de lodo almacenado diariamente.
- ✓ El hecho de que la producción de lodos sea un proceso por lotes determinó que el tratamiento diseñado sea también un proceso por lotes donde se trate el lodo en fases distintas con una posterior descarga para su disposición final. Dicho tratamiento consta de un tanque espesador de lodos de volumen de 30 m<sup>3</sup>, un tanque agitador del lodo con una previa adición de cal de 20 m<sup>3</sup>, un tanque receptor de agua sobrenadante de 45 m<sup>3</sup> y un secador rectangular con capacidad de almacenar el lodo encalado durante el tiempo de reacción del mismo.
- ✓ Como resultado del tratamiento de encalado se realizó un análisis posterior al lodo a fin de validar el proceso diseñado, confirmando que el tratamiento en general reduce los niveles de aluminio hasta 1/3 del valor inicial y de hierro casi a la sexta parte del valor encontrado, nivelando también el valor de su pH hasta 7.04. Todas estas variables con excepción de la variación del hierro poseen una alta correlación, no menor a 0.95 siendo el indicador más importante para respaldar la eficiencia del tratamiento de encalado para aluminio y pH, y ratificando la aireación únicamente para el hierro.

### 3.9 Recomendaciones

- ✓ Es importante tener personal dedicado al vaciado y llenado de los tanques en los tiempos programados, de ello en especial dependerá el éxito del sistema de tratamiento.
- ✓ Al momento de añadir la cal es recomendable que ésta sea disuelta previamente con agua sobrenadante del tanque 2 (agitador), en una proporción 1:2 (recomendada por pruebas experimentales), con el objetivo de que la posibilidad de formación de grumos se minimice al máximo y se pueda evitar que la cantidad de cal calculada reaccione conforme a lo previsto.
- ✓ Es necesario realizar un análisis frecuente de la cantidad de aluminio presente en el lodo, no sobrepase los 39.88 mg/kg, a fin de evitar que la cal añadida sea insuficiente o para el encalado, para el cual su cantidad calculada es la apropiada.
- ✓ Se debe analizar de igual forma eventualmente el aluminio, hierro y pH del agua cruda de ingreso a la planta para descartar otras fuentes de contaminación que no sea la adición de policloruro de aluminio (PAC).
- ✓ El tiempo de uso del motor para accionar el impulsor debe ser basado en el tiempo de disolución de la cal por observancia, a través de pruebas experimentales, el tiempo más adecuado es alrededor de diez minutos,

### 3.10 Cronograma de ejecución del proyecto

**Tabla 26-3:** Cronograma de ejecución del proyecto

| ACTIVIDAD                                      | TIEMPO |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |
|--|--------|---|---|---|--------|---|---|---|--------|---|---|---|--------|---|---|---|--------|---|---|---|--------|---|---|---|
|  | 1° MES |   |   |   | 2° MES |   |   |   | 3° MES |   |   |   | 4° MES |   |   |   | 5° MES |   |   |   | 6° MES |   |   |   |
|  | 1      | 2 | 3 | 4 | 1      | 2 | 3 | 4 | 1      | 2 | 3 | 4 | 1      | 2 | 3 | 4 | 1      | 2 | 3 | 4 | 1      | 2 | 3 | 4 |
| Muestreo de lodos                              | ■      | ■ |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |
| Caracterización de lodos                       |        |   | ■ | ■ | ■      |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |
| Identificación de variables de diseño          |        |   | ■ | ■ | ■      | ■ |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |
| Pruebas de tratabilidad                        |        |   |   |   |        | ■ | ■ | ■ | ■      |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |
| Análisis de resultados                         |        |   | ■ | ■ | ■      | ■ | ■ | ■ | ■      | ■ |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |
| Validación del sistema de tratamiento de lodos |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   | ■      | ■ |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |
| Aplanamiento y nivelación del terreno          |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        | ■ | ■ |   |        |   |   |   |        |   |   |   |
| Empedrado y replantillo de bases               |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   | ■      |   |   |   |        |   |   |   |
| Encofrado y fundido de tanques                 |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        | ■ | ■ | ■ |        |   |   |   |
| Instalación de equipos, accesorios y pintura.  |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   | ■ | ■ |        |   |   |   |
| Instalación eléctrica e hidráulica             |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   | ■      | ■ |   |   |
| Acondicionamiento final                        |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |        |   | ■ |   |

Realizado por: Washington Arosteguí, 2017

## BIBLIOGRAFÍA

1. **BARRETO SÁENZ, Patricia.** *Procedimiento de muestreo de Agua Superficial* [en línea]. Perú, 2009. [Consulta: 20 enero 2017]. Disponible en: [http://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user\\_upload/p\\_biorem/education/research/protocols/PROCEDIMIENTO\\_DE\\_MUESTREO\\_DE\\_AGUA\\_SUPERFICIAL.pdf](http://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/protocols/PROCEDIMIENTO_DE_MUESTREO_DE_AGUA_SUPERFICIAL.pdf)
2. **CERÓN BURGOS, Andrés David.** *Diseño de un sistema de Tratamiento de Lodos generados en la Planta de Potabilización de Agua sector Casigana de la EP-EMAPA-A* [En línea] (Tesis). (Pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2016. pp. 32-43. [Consulta: 2017-08-06]. Disponible en: <http://dspace.espech.edu.ec/handle/123456789/6514>.
3. **CHOPEY, Nicholas; & HICKS, Tyler.** Manual de Cálculos de Ingeniería Química. México. McGraw-Hill. 1986. pp. 344-346.
4. **ECUADOR. MINISTERIO DEL AMBIENTE.** Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental. Quito-Ecuador. Subsecretaría de Patrimonio Natural. 2012. pp. 33-38.
5. **ESPINOSA, José; & MOLINA, Eloy.** Acidez y Encalado de los Suelos. Quito-Ecuador. International Plant Nutrition Institute. 1999. pp. 1-34.
6. **FERREIRA, Pricilla; et.al.** Aluminio como factor de riesgo para la enfermedad de Alzheimer. *Rev. Latino-Am. Enfermagem* [en línea]. 2008, vol.16, n.1 [Consulta: 5 diciembre 2016], pp.151-157. Disponible en: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S010411692008000100023&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010411692008000100023&lng=en&nrm=iso)
7. **FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO).** *Análisis financiero y preparación de recomendaciones* [en línea]. Italia, 2007. [Consulta: 25 febrero 2018]. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/008/a0323s/a0323s09.htm>
8. **GARCÉS, Fernando; DÍAZ, Juan; DELLEPIANE, Oscar.** *Acondicionamiento de Lodos producidos en el Tratamiento de Agua Potable* [en línea]. [Consulta: 21 febrero 2017]. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliagua/mexico/02263e09.pdf>.
9. **GARRIDO VALERO, Soledad.** Interpretación de análisis de suelos. Getafe-España. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. 1994. pp. 28.

10. **GÓMEZ, Sergio.** Metodología de la Investigación. México. Red Tercer Milenio S.C. 2012. pp. 5-17.
11. **GUANOLUISA DÍAZ, Victoria Karina,** *Optimización de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Yanahurco, provincia de Tungurahua* [En línea] (Tesis). (Pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2015. pp. 1-5. [Consulta: 2017-04-06]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/4781>
12. **LENNTECH.** *Tratamiento y Purificación del Agua Eliminación de hierro* [en línea]. Países Bajos, 2009. [Consulta: 25 abril 2017]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/processes/iron-manganese/iron-removal.htm>.
13. **MC Cabe, Warren L.; SMITH, Julián C.; HARRIOTT, Peter.** Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Madrid-España. McGraw-Hill. 1998. pp. 242-266.
14. **MOLINA, Eloy.** Encalado para la corrección de la acidez del suelo. San José-Costa Rica. Centro de Investigaciones Agronómicas Universidad de Costa Rica. 1998. pp. 1-13.
15. **MUJERIEGO, Rafael.** Riego con agua residual Municipal Regenerada-Manual Práctico. Cataluña-España. Universitat Politècnica de Catalunya. 1990. pp. 44-47.
16. **NOM-004-SEMARNAT-2002.-** Norma Oficial Mexicana Protección Ambiental-Lodos y Biosólidos. Consejo Federal De Entidades Y Servicios Sanitarios De Argentina. [En línea]. [Consulta: 20/04/2016]. Disponible en: [http://www.cofes.org.ar/descargas/relas/4\\_jornada/Norma\\_Mexicana\\_2003.pdf](http://www.cofes.org.ar/descargas/relas/4_jornada/Norma_Mexicana_2003.pdf).
17. **ORTIZ HERNÁNDEZ, Ma. Laura; GUTIÉRREZ RUIZ, Margarita E.; SÁNCHEZ SALINAS, Enrique.** Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, Estado de Morelos, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* [en línea] 1995, (México) pp. 105-115. [Consulta: 13 de agosto de 2016] ISSN 0188-4999. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37011206>
18. **OSORIO, Nelson W.** *Acidez del suelo y su manejo* [en línea]. Colombia. Ph.D. Walter Osorio, 2014. [Consulta: 21 febrero 2017]. Disponible en: [www.walterosorio.net/web/node/7](http://www.walterosorio.net/web/node/7).
19. **RAMALHO, Rubens. S.** Tratamiento de aguas residuales. Barcelona-España. Editorial REVERTÉ S.A. 1991. pp. 551-578.

20. **RAMÍREZ QUIRÓS, Francisco.** *Lodos producidos en el tratamiento del agua potable* [en línea]. Ecuador, Webmaster: F. Ramírez, 2008. [Consulta: 4 diciembre 2016]. Disponible en: [http://www.elaguapotable.com/tratamiento\\_de\\_lodos.htm](http://www.elaguapotable.com/tratamiento_de_lodos.htm).
21. **RICAUARTE FREIRE, Luis Eduardo.** *Diseño y simulación de un tanque mezclador de 10000 gal para la elaboración de aceites lubricantes* [En línea] (Tesis). (Pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador. 2016. pp. 34-40. [Consulta: 2017-09-17]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/36620>.
22. **SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN, SAGARPA.** *Elaboración de composta*. Texcoco-México. Subsecretaría de desarrollo rural. 2007. pp. 1-7.
23. **SCARANO, Eduardo.** *Manual de redacción de escritos de investigación*. Buenos Aires-Argentina. MACHI Grupo Editor S.A. 2004. pp. 101-110.
24. **SATTI, Silvia Patricia.** *Métodos de análisis de lodos, tratamiento, disposición y usos* [en línea], Argentina, Patricia Satti, 2015. [Consulta: 4 diciembre 2016]. Disponible en: [http://www.cofes.org.ar/descargas/relas/4\\_jornada/1\\_Curso\\_Metodos\\_Dra\\_Patricia\\_Satti\\_COFES-1.pdf](http://www.cofes.org.ar/descargas/relas/4_jornada/1_Curso_Metodos_Dra_Patricia_Satti_COFES-1.pdf).
25. **SOLÓRZANO DEL RIO, Héctor.** *El aluminio: Su relación con la enfermedad del Alzheimer* [en línea], México, Dr. Héctor Solórzano, 2004. [Consulta: 4 diciembre 2016]. Disponible en: <http://hector.solorzano.com.mx/046.html>.

## ANEXOS

### ANEXO A: ANÁLISIS PREVIO AL TRATAMIENTO DE LOS LODOS REALIZADO POR UN LABORATORIO CERTIFICADO.

| LABORATORIO DE SERVICIOS AMBIENTALES  |   |                                    |           |        |                   |
|---|---|------------------------------------|-----------|--------|-------------------|
| Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación No. OAE LE C 12-006        |   |                                    |           |        |                   |
| N° SE: 104 - 16   |   |                                    |           |        |                   |
| <b>INFORME DE ANALISIS</b>  |   |                                    |           |        |                   |
| <b>NOMBRE:</b> Ing. Karina Guanoluisa   | <b>INFORME N°:</b> 104 - 16             |                                    |           |        |                   |
| <b>EMPRESA:</b> JAAPARY   | <b>N° SE:</b> 104 - 16                  |                                    |           |        |                   |
| <b>DIRECCIÓN:</b> Yanahurco   | <b>FECHA DE RECEPCIÓN:</b> 13 - 12 - 16 |                                    |           |        |                   |
| <b>TELÉFONO:</b> 032580374  | <b>FECHA DE INFORME:</b> 20- 12 - 16    |                                    |           |        |                   |
| <b>NÚMERO DE MUESTRAS:</b> 1  | Lodos, Planta de tratamiento, Yanahurco |                                    |           |        |                   |
| <b>IDENTIFICACIÓN:</b> MA - 227 -16   | Planta de tratamiento                   |                                    |           |        |                   |
|   | <b>TIPO DE MUESTRA:</b> Agua            |                                    |           |        |                   |
| El laboratorio se responsabiliza solo del análisis, no de la obtención de las muestras. |   |                                    |           |        |                   |
| <b>RESULTADO DE ANÁLISIS</b>  |   |                                    |           |        |                   |
| MA - 227-16   |   |                                    |           |        |                   |
| PARÁMETROS  | UNIDADES                                | MÉTODO/PROCEDIMIENTO               | RESULTADO | U(K=2) | FECHA DE ANÁLISIS |
| Potencial Hidrógeno pH  | -                                       | STANDARD METHODS 4500 - H B        | 5,63      | N/A    | 13 - 12 - 16      |
| Conductividad   | us/cm                                   | STANDARD METHODS 2510 - B          | 306       | N/A    | 13 - 12 - 16      |
| Cadmio  | mg/l                                    | STANDARD METHODS 3500 Cd - 3111B   | < 0,0001  | N/A    | 13 - 12 - 16      |
| Cromo   | mg/l                                    | STANDARD METHODS 3500 - Cr - 3111B | 1,22      | N/A    | 13 - 12 - 16      |
| Aluminio  | mg/l                                    | STANDARD METHODS 3500 Al -3111D    | 0,37      | N/A    | 13 - 12 - 16      |
| Calcio  | mg/l                                    | STANDARD METHODS 3500 Ca 3111B     | 29,16     | N/A    | 13 - 12 - 16      |
| Magnesio  | mg/l                                    | STANDARD METHODS 3500 Mg - 3111B   | 7,43      | N/A    | 13 - 12 - 16      |
| Potasio   | mg/l                                    | STANDARD METHODS 3500 Na - B       | 9,04      | N/A    | 13 - 12 - 16      |
| Sodio   | mg/l                                    | STANDARD METHODS 3500 K - B        | 6,35      | N/A    | 13 - 12 - 16      |
| Hierro  | mg/l                                    | STANDARD METHODS 3500 Fe - 3111B   | 87,2      | N/A    | 13 - 12 - 16      |
| Color Aparente  | Upt-Co                                  | STANDARD METHODS 2120 - C          | 11075     | N/A    | 13 - 12 - 16      |
| Turbidez  | NTU                                     | STANDARD METHODS 2130 B            | 724       | N/A    | 13 - 12 - 16      |
| Níquel  | mg/l                                    | STANDARD METHODS 3500 Ni - 3111B   | 0,70      | N/A    | 13 - 12 - 16      |
| Sólidos Suspendidos   | mg/l                                    | STANDARD METHODS 2540 - D          | 1225      | N/A    | 13 - 12 - 16      |
| Zinc  | mg/l                                    | STANDARD METHODS 3500 - Zn - 3111B | 0,051     | N/A    | 13 - 12 - 16      |

-Los resultados de este informe corresponden únicamente a la(s) muestra(s) analizada(s).  
- Los ensayos marcados con (\*) no están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE.  
-Se prohíbe la reproducción parcial de este informe sin la autorización del laboratorio.

Página 1 de 2

L.S.A. Campus Máster Edison Riera Km 1 ½ vía a Guano Bloque Administrativo.





## LABORATORIO DE SERVICIOS AMBIENTALES

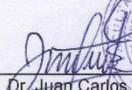
Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación No. OAE LE C 12-006

N° SE: 104 - 16

**MÉTODOS UTILIZADOS:** Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales APHA, AWWA, WPCF, STANDARD METHODS 21° EDICIÓN y métodos HACH adaptados del STANDARD METHODS 21° EDICIÓN.

**RESPONSABLES DEL ANÁLISIS:**

Dr. Juan Carlos Lara R.  
Benito Mendoza T., PhD

  
Dr. Juan Carlos Lara R.  
TECNICO L.S.A.



- Los resultados de este informe corresponden únicamente a la(s) muestra(s) analizada(s).
- Los ensayos marcados con (\*) no están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE.
- Se prohíbe la reproducción parcial de este informe sin la autorización del laboratorio.

Página 2 de 2

FMC2101-01

L.S.A. Campus Máster Edison Riera Km 1 ½ vía a Guano Bloque Administrativo.

**ANEXO B: ANÁLISIS PREVIO AL TRATAMIENTO DE LOS LODOS REALIZADO POR UN LABORATORIO CERTIFICADO.**




**LABORATORIO DE SERVICIOS AMBIENTALES**

N° SE: 004 - 17

**INFORME DE ANALISIS**

**NOMBRE:** Sr. Andrés Arostegui **INFORME N°:** 004 - 17  
**EMPRESA:** Proyecto de Tesis ESPOCH **N° SE:** 004 - 17  
**DIRECCIÓN:** Av. Maldonado **FECHA DE RECEPCIÓN:** 06 - 02 - 17  
**TELÉFONO:** 032580374 **FECHA DE INFORME:** 22 - 02 - 17

**NÚMERO DE MUESTRAS:** 1 Lodos, Planta de tratamiento, Yanahurco **TIPO DE MUESTRA:**  
**IDENTIFICACIÓN:** MS- 023 -17 Planta de tratamiento Lodos

El laboratorio se responsabiliza solo del análisis, no de la obtención de las muestras.

**RESULTADO DE ANÁLISIS**  
**MA - 023-17**

| PARÁMETROS         | UNIDADES          | MÉTODO/PROCEDIMIENTO             | RESULTADO     | U(K=2)   | FECHA DE ANÁLISIS |
|--------------------|-------------------|----------------------------------|---------------|----------|-------------------|
| pH                 | -                 | STANDARD METHODS 4500 - H B      | 7,22          | +/- 0,08 | 06 - 02 - 17      |
| Materia Orgánica   | %                 | METODO INTERNO                   | 68,45         | N/A      | 06 - 02 - 17      |
| Humedad            | %                 | METODO INTERNO                   | 95,70         | N/A      | 06 - 02 - 17      |
| Densidad           | g/cm <sup>3</sup> | METODO INTERNO                   | 0,99          | N/A      | 06 - 02 - 17      |
| Aluminio           | mg/l              | STANDARD METHODS 3500 Al -3111D  | 41,08         | N/A      | 06 - 02 - 17      |
| Calcio             | mg/l              | STANDARD METHODS 3500 Ca 3111B   | 14,73         | N/A      | 06 - 02 - 17      |
| Magnesio           | mg/l              | STANDARD METHODS 3500 Mg - 3111B | 6,97          | N/A      | 06 - 02 - 17      |
| Potasio            | mg/l              | STANDARD METHODS 3500 Na - B     | 8,45          | N/A      | 06 - 02 - 17      |
| Sodio              | mg/l              | STANDARD METHODS 3500 K - B      | 6,64          | N/A      | 06 - 02 - 17      |
| Hierro             | mg/l              | STANDARD METHODS 3500 Fe - 3111B | 74,0          | N/A      | 06 - 02 - 17      |
| Coliformes fecales | NMP/100 ml        | STANDARD METHODS 9221 - B        | <2 (Ausencia) | N/A      | 06 - 02 - 17      |

**MÉTODOS UTILIZADOS:** Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales APHA, AWWA, WPCF, STANDARD METHODS 21ª EDICIÓN y métodos HACH adaptados del STANDARD METHODS 21ª EDICIÓN.

**RESPONSABLES DEL ANÁLISIS:**  
 Dr. Juan Carlos Lara R.  
 Benito Mendoza T., PhD



Dr. Juan Carlos Lara R.  
**TECNICO L.S.A.**

-Los resultados de este informe corresponden únicamente a la(s) muestra(s) analizada(s).  
 -Se prohíbe la reproducción parcial de este informe sin la autorización del laboratorio.

FMC2101-01

Página 1 de 1

L.S.A. Campus Máster Edison Riera Km 1 ½ vía a Guano Bloque Administrativo.

**ANEXO C: ANÁLISIS DESPUÉS DEL PRIMER MES DE ENCALADO  
REALIZADO POR UN LABORATORIO CERTIFICADO.**




**LABORATORIO DE SERVICIOS AMBIENTALES**

Nº SE: 006 - 17

**INFORME DE ANALISIS**

**NOMBRE:** Sr. Andrés Arostegui **INFORME Nº:** 006 - 17  
**EMPRESA:** Proyecto de Tesis ESPOCH **Nº SE:** 006 - 17  
**DIRECCIÓN:** Av. Maldonado **FECHA DE RECEPCIÓN:** 24 - 04 - 17  
**TELÉFONO:** 032580374 **FECHA DE INFORME:** 26- 04 - 17

**NÚMERO DE MUESTRAS:** 6 Lodos, Planta de tratamiento, Yanahurco **TIPO DE MUESTRA:**

**IDENTIFICACIÓN:**

|             |   |      |
|-------------|---|------|
| MS- 025 -17 | 1 | Lodo |
| MS- 026 -17 | 2 | Lodo |
| MS- 027 -17 | 3 | Lodo |
| MS- 028 -17 | 4 | Lodo |
| MS- 029 -17 | 5 | Lodo |
| MS- 030 -17 | 6 | Lodo |

El laboratorio se responsabiliza solo del análisis, no de la obtención de las muestras.

**RESULTADO DE ANÁLISIS**

**MA - 025-17** 0,4

| PARÁMETROS | UNIDADES | MÉTODO/PROCEDIMIENTO             | RESULTADO | U(K=2)   | FECHA DE ANÁLISIS |
|------------|----------|----------------------------------|-----------|----------|-------------------|
| pH         | -        | STANDARD METHODS 4500 - H B      | 7,21      | +/- 0,08 | 24 - 04 - 17      |
| Humedad    | %        | METODO INTERNO                   | 98,8      | N/A      | 24 - 04 - 17      |
| Aluminio   | mg/l     | STANDARD METHODS 3500 Al -3111D  | 24,72     | N/A      | 24 - 04 - 17      |
| Hierro     | mg/l     | STANDARD METHODS 3500 Fe - 3111B | 36,0      | N/A      | 24 - 04 - 17      |

**MA - 026-17** 0,8

| PARÁMETROS | UNIDADES | MÉTODO/PROCEDIMIENTO             | RESULTADO | U(K=2)   | FECHA DE ANÁLISIS |
|------------|----------|----------------------------------|-----------|----------|-------------------|
| pH         | -        | STANDARD METHODS 4500 - H B      | 7,04      | +/- 0,08 | 24 - 04 - 17      |
| Humedad    | %        | METODO INTERNO                   | 98,1      | N/A      | 24 - 04 - 17      |
| Aluminio   | mg/l     | STANDARD METHODS 3500 Al -3111D  | 22,46     | N/A      | 24 - 04 - 17      |
| Hierro     | mg/l     | STANDARD METHODS 3500 Fe - 3111B | 16,0      | N/A      | 24 - 04 - 17      |

**MA - 027-17** 1,6

| PARÁMETROS | UNIDADES | MÉTODO/PROCEDIMIENTO             | RESULTADO | U(K=2)   | FECHA DE ANÁLISIS |
|------------|----------|----------------------------------|-----------|----------|-------------------|
| pH         | -        | STANDARD METHODS 4500 - H B      | 7,10      | +/- 0,08 | 24 - 04 - 17      |
| Humedad    | %        | METODO INTERNO                   | 97,64     | N/A      | 24 - 04 - 17      |
| Aluminio   | mg/l     | STANDARD METHODS 3500 Al -3111D  | 22,88     | N/A      | 24 - 04 - 17      |
| Hierro     | mg/l     | STANDARD METHODS 3500 Fe - 3111B | 43,0      | N/A      | 24 - 04 - 17      |

-Los resultados de este informe corresponden unicamente a la(s) muestrat(s) analizad(a)s.  
 -Se prohíbe la reproducción parcial de este informe sin la autorización del laboratorio.

  
**FMC2101-01**

Página 1 de 2

L.S.A. Campus Máster Edison Riera Km 1 ½ vía a Guano Bloque Administrativo.



## LABORATORIO DE SERVICIOS AMBIENTALES



N° SE: 006 - 17

MA - 028-17

| PARÁMETROS | UNIDADES | MÉTODO/PROCEDIMIENTO             | RESULTADO | U(K=2)   | FECHA DE ANÁLISIS |
|------------|----------|----------------------------------|-----------|----------|-------------------|
| pH         | -        | STANDARD METHODS 4500 - H B      | 7,52      | +/- 0,08 | 24 - 04 - 17      |
| Humedad    | %        | METODO INTERNO                   | 98,02     | N/A      | 24 - 04 - 17      |
| Aluminio   | mg/l     | STANDARD METHODS 3500 Al -3111D  | 21,35     | N/A      | 24 - 04 - 17      |
| Hierro     | mg/l     | STANDARD METHODS 3500 Fe - 3111B | 29,0      | N/A      | 24 - 04 - 17      |

MA - 029-17

| PARÁMETROS | UNIDADES | MÉTODO/PROCEDIMIENTO             | RESULTADO | U(K=2)   | FECHA DE ANÁLISIS |
|------------|----------|----------------------------------|-----------|----------|-------------------|
| pH         | -        | STANDARD METHODS 4500 - H B      | 8,51      | +/- 0,08 | 24 - 04 - 17      |
| Humedad    | %        | METODO INTERNO                   | 97,32     | N/A      | 24 - 04 - 17      |
| Aluminio   | mg/l     | STANDARD METHODS 3500 Al -3111D  | 19,84     | N/A      | 24 - 04 - 17      |
| Hierro     | mg/l     | STANDARD METHODS 3500 Fe - 3111B | 39,0      | N/A      | 24 - 04 - 17      |

MA - 030-17

| PARÁMETROS | UNIDADES | MÉTODO/PROCEDIMIENTO             | RESULTADO | U(K=2)   | FECHA DE ANÁLISIS |
|------------|----------|----------------------------------|-----------|----------|-------------------|
| pH         | -        | STANDARD METHODS 4500 - H B      | 10,40     | +/- 0,08 | 24 - 04 - 17      |
| Humedad    | %        | METODO INTERNO                   | 96,99     | N/A      | 24 - 04 - 17      |
| Aluminio   | mg/l     | STANDARD METHODS 3500 Al -3111D  | 17,22     | N/A      | 24 - 04 - 17      |
| Hierro     | mg/l     | STANDARD METHODS 3500 Fe - 3111B | 39,0      | N/A      | 24 - 04 - 17      |

**MÉTODOS UTILIZADOS:** Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales APHA, AWWA, WPCF, STANDARD METHODS 21ª EDICIÓN y métodos HACH adaptados del STANDARD METHODS 21ª EDICIÓN.

**RESPONSABLES DEL ANÁLISIS:**

Dr. Juan Carlos Lara R.  
Benito Mendoza T., PhD

  
Dr. Juan Carlos Lara R.  
TECNICO L.S.A.

-Los resultados de este informe corresponden únicamente a la(s) muestra(s) analizad(a)s.  
-Se prohíbe la reproducción parcial de este informe sin la autorización del laboratorio.

**ANEXO D: ANÁLISIS DESPUÉS DEL PRIMER SEMESTRE DE ENCALADO (MUESTRA CON CAMBIO) REALIZADO POR UN LABORATORIO CERTIFICADO.**



**LABORATORIO DE SERVICIOS AMBIENTALES**

Nº SE: 024 - 17

**INFORME DE ANALISIS**

**NOMBRE:** Sr. Andrés Arosteguí **INFORME Nº:** 024 - 17  
**EMPRESA:** Proyecto de Tesis ESPOCH **Nº SE:** 024 - 17  
**DIRECCIÓN:** Av. Maldonado  
**TELÉFONO:** 032580374 **FECHA DE RECEPCIÓN:** 22 - 11 - 17  
**FECHA DE INFORME:** 28 - 11 - 17

**NÚMERO DE MUESTRAS:** 1 **Lodos, Planta de tratamiento, Yanahurco** **TIPO DE MUESTRA:**  
**IDENTIFICACIÓN:** MS- 077 -17 **Planta de tratamiento** **Lodos**

El laboratorio se responsabiliza solo del análisis, no de la obtención de las muestras.

**RESULTADO DE ANÁLISIS**

MA - 077-17

| PARÁMETROS | UNIDADES | MÉTODO/PROCEDIMIENTO                | RESULTADO | U(K=2)   | FECHA DE ANÁLISIS |
|------------|----------|-------------------------------------|-----------|----------|-------------------|
| pH         | -        | STANDARD METHODS<br>4500 - H B      | 6,80      | +/- 0,08 | 22 - 11 - 17      |
| Aluminio   | mg/l     | STANDARD METHODS<br>3500 Al -3111D  | 13,60     | N/A      | 22 - 11 - 17      |
| Hierro     | mg/l     | STANDARD METHODS<br>3500 Fe - 3111B | 11,30     | N/A      | 22 - 11 - 17      |

**MÉTODOS UTILIZADOS:** Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales APHA, AWWA, WPCF, STANDARD METHODS 21ª EDICIÓN y métodos HACH adaptados del STANDARD METHODS 21ª EDICIÓN.

**RESPONSABLES DEL ANÁLISIS:**

Dr. Juan Carlos Lara R.  
Benito Mendoza T., PhD

  
Dr. Juan Carlos Lara R.  
TÉCNICO L.S.A.

-Los resultados de este informe corresponden únicamente a la(s) muestra(s) analizada(s).  
-Se prohíbe la reproducción parcial de este informe sin la autorización del laboratorio.

**ANEXO E: ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN DE LA CAL REALIZADO POR UN LABORATORIO CERTIFICADO.**



**Escuela Superior Politécnica del Litoral**  
**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**  
**Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales**



(RG\_5-10)

Solicitante: **Gina Gavilánez**  
Certificado de Análisis N°: 048A-2015  
Fecha de recepción de muestra(s): 29-05-2015  
Fecha de entrega de resultados: 05-06-2015

| Parámetro  | Unidad | Resultado | Método de Análisis |
|--|--------|-----------|--------------------|
| Hidróxido de Calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) | %      | 63.29     | Volumétrico        |
| Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ )          | %      | 29.35     | Gravimétrico       |

Observaciones: Muestra(s) entregada(s) e ingresada(s) por el cliente como:  
"CAL P-24"

**Dra. Paola Almeida Guerra**  
**Directora del Departamento de**  
**Ciencias Químicas y Ambientales**

LCC/.

**Notas:** Este informe es válido solo con el sello de seguridad de alto relieve y no podrá ser reproducido de forma parcial o total.  
Los resultados obtenidos corresponden solo a la muestra analizada.  
Las cifras luego del punto (.) deben ser consideradas como decimales.  
Las cifras luego de la coma (,) deben ser consideradas como enteros.

Guayaquil – Campus Gustavo Galindo, km 30.5 vía Perimetral, Código Postal 090903  
Teléfonos: 2269559 – 2269563 Página web: [www.icqa.espol.edu.ec](http://www.icqa.espol.edu.ec) e-mail: [acisnero@espol.edu.ec](mailto:acisnero@espol.edu.ec)

**ANEXO F: TABLA 1. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS EN BIOSÓLIDOS (NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-004-SEMARNAT-2002.-PROTECCIÓN AMBIENTAL- LODOS Y BIOSÓLIDOS).**

| <b>Contaminante</b> | <b>Excelentes (mg/kg)</b> | <b>Buenos (mg/kg)</b> |
|---------------------|---------------------------|-----------------------|
| Arsénico            | 41                        | 75                    |
| Cadmio              | 39                        | 85                    |
| Cromo               | 1200                      | 3000                  |
| Cobre               | 1500                      | 4300                  |
| Plomo               | 300                       | 840                   |
| Mercurio            | 17                        | 57                    |
| Níquel              | 420                       | 420                   |
| Zinc                | 2800                      | 7500                  |

**ANEXO G: TABLA 2. LÍMITES PERMISIBLES PARA PATÓGENOS Y PARÁSITOS EN BIOSÓLIDOS (NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-004-SEMARNAT-2002.- PROTECCIÓN AMBIENTAL- LODOS Y BIOSÓLIDOS).**

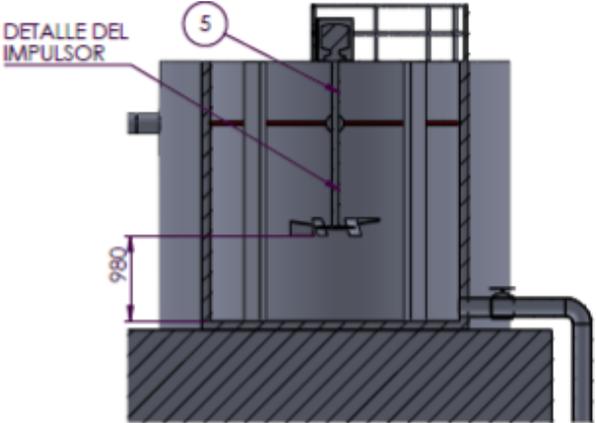
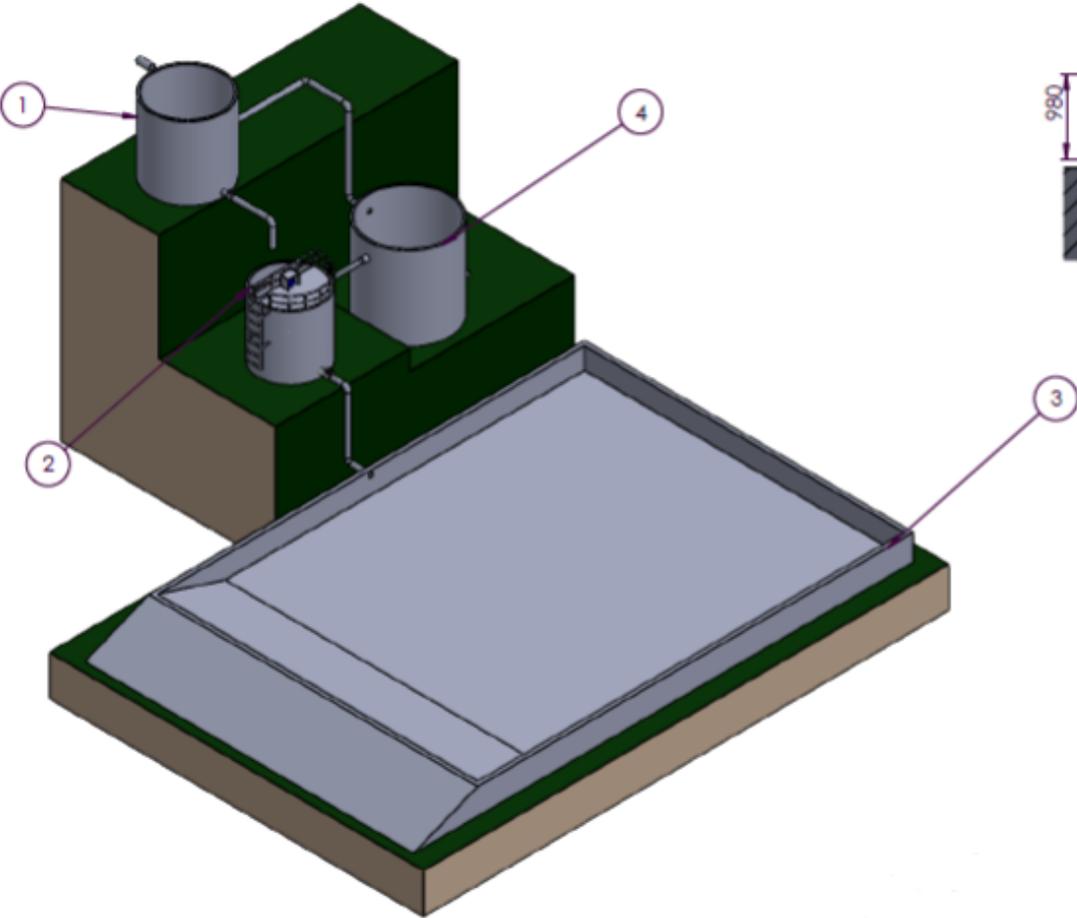
| <b>CLASE</b> | <b>INDICADOR BACTERIOLÓGICO DE CONTAMINACIÓN</b> | <b>PATÓGENOS</b>        | <b>PARÁSITOS</b>               |
|--------------|--|-------------------------|--------------------------------|
|              | Coliformes fecales<br>NMP/g                      | Salmonella spp<br>NMP/g | Huevos de<br>Helmitos<br>NMP/g |
| <b>A</b>     | <1000  | < 3                     | < 1                            |
| <b>B</b>     | <1000  | < 3                     | < 10                           |
| <b>C</b>     | <2×10 <sup>6</sup>                               | < 300                   | < 35                           |

**ANEXO H: TABLA 3.5 CONCENTRACIONES MÁXIMAS DE MICROELEMENTOS RECOMENDADA EN AGUAS DE RIEGO (RAFAEL MUJERIEGO-MANUAL DE RIEGO CON AGUA RESIDUAL REGENERADA).**

| <b>Micro elementos</b> | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>Observaciones</b>  |
|------------------------|----------|----------|---|
| Al (aluminio)          | 5.0      | 20.0     | Puede provocar una falta de productividad en suelos ácidos, pH<5.5, aunque suelos más alcalinos precipitarán el ión y eliminarán cualquier toxicidad.   |
| As (arsénico)          | 0.1      | 2.0      | Su fitotoxicidad varía ampliamente, entre 12 mg/l para la hierba del Sudán hasta menos de 0.5 mg/l para el arroz.   |
| Be (berilio)           | 0.1      | 0.5      | Su fitotoxicidad varía ampliamente entre 5 mg/l para la col rizada hasta 0.5 mg/l para las judías verdes.   |
| Cd (cadmio)            | 0.01     | 0.05     | Es tóxico para las judías, la remolacha y los nabos a concentraciones tan bajas como 0.1 mg/l en disolución. Los límites recomendados son conservadores debido a su capacidad para acumularse en el suelo y en las plantas hasta concentraciones que pueden ser perjudiciales para las personas.              |
| Co (cobalto)           | 0.05     | 5.0      | Es tóxico para la planta del tomate a una concentración de 0.1 mg/l en disolución. Suele ser inactivado por suelos neutros o alcalinos.   |
| Cr (cromo)             | 0.1      | -        | No está considerado como un elemento esencial para el crecimiento. Los límites recomendados son conservadores debido a los escasos conocimientos sobre su fitotoxicidad.  |
| Cu (cobre)             | 0.2      | 15.0     | Es tóxico para diversas plantas a concentraciones entre 0.1 y 1.0 mg/l en disolución.   |
| F (fluoruros)          | 1.0      | 15.0     | Es inactivado por suelos neutros o alcalinos.   |
| Fe (hierro)            | 5.0      | 20.0     | No es tóxico para las plantas en suelos aireados, pero puede contribuir a la acidificación del suelo y a la disminución del fósforo y molibdeno, elementos esenciales para las plantas. El riego por aspersión elevado puede dar lugar a depósitos desagradables en las plantas, los equipos y los edificios. |
| Li (litio)             | 2.5      | 2.5      | Es tolerado por la mayoría de los cultivos hasta 5 mg/l, es un elemento móvil en el suelo. Es tóxico para los cítricos a concentraciones superiores a 0.075 mg/l. Actúa de forma similar al boro.   |
| Mn (manganeso)         | 0.2      | 10.0     | Es tóxico para diversas plantas concentraciones entre unas décimas y unos miligramos por litro, aunque principalmente en suelos ácidos.   |

|  |      |      |   |
|--|------|------|---|
| Mo (molibdeno)   | 0.01 | 0.05 | No es tóxico para las plantas a las concentraciones normalmente presentes en el suelo y en el agua. Puede ser tóxico para el ganado cuando el forraje se cultiva en suelos con elevadas concentraciones de molibdeno disponible.  |
| Ni (níquel)  | 0.2  | 0.2  | Es tóxico para diversas plantas a concentraciones entre 0.5 y 1.0 mg/l. Su toxicidad disminuye a pH neutro o alcalino.  |
| Pb (plomo)   | 5.0  | 10.0 | Puede inhibir e crecimiento de las células vegetales a concentraciones muy elevadas.  |
| Se (selenio)   | 0.02 | 0.02 | Es tóxico para las plantas a concentraciones tan pequeñas como 0.025 mg/l y para el ganado cuando el forraje se cultiva en suelos con niveles relativamente alto en selenio añadido. Es un elemento esencial para el crecimiento de los animales, pero en concentraciones muy pequeñas. |
| Sn (estaño)  | -    | -    | Las Plantas lo rechazan de forma eficaz, su tolerancia específica es desconocida.   |
| Ti (titanio)   | -    | -    | Comportamiento similar al estaño.   |
| W (wolframio)  | -    | -    | Comportamiento similar al estaño.   |
| V (vanadio)  | 0.1  | 1.0  | Es tóxico para muchas plantas a concentraciones relativamente bajas.  |
| Zn (zinc)  | 2.0  | 10.0 | Es toxico para muchas plantas a concentraciones muy variables, su toxicidad disminuye a pH>6.0 y en suelos con textura fina o de carácter orgánico.   |
| *La columna A constituye los límites en mg/kg a los que se deberían esperar efectos desfavorables en las plantas o en el suelo, cuando una zona determinada se riega con agua de esta calidad. |      |      |   |
| *La columna B se refiere a las concentraciones máximas permisibles en mg/kg que estos compuestos pueden tener en el suelo (textura fina y pH 6.0-8.5   |      |      |   |

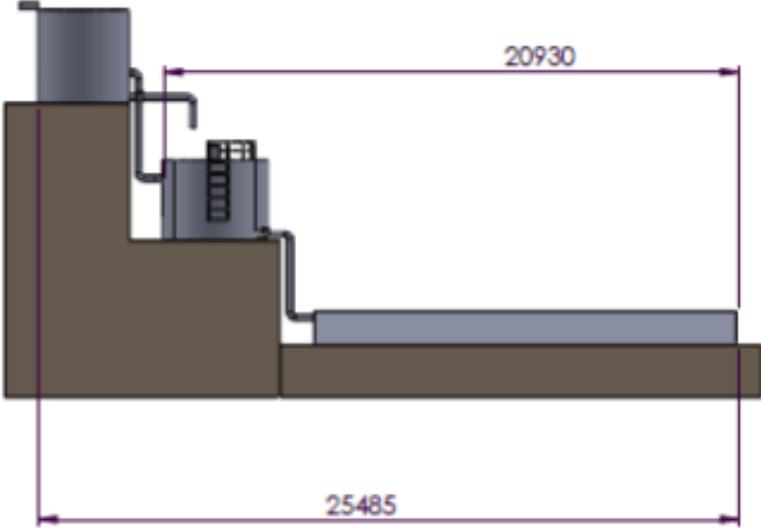
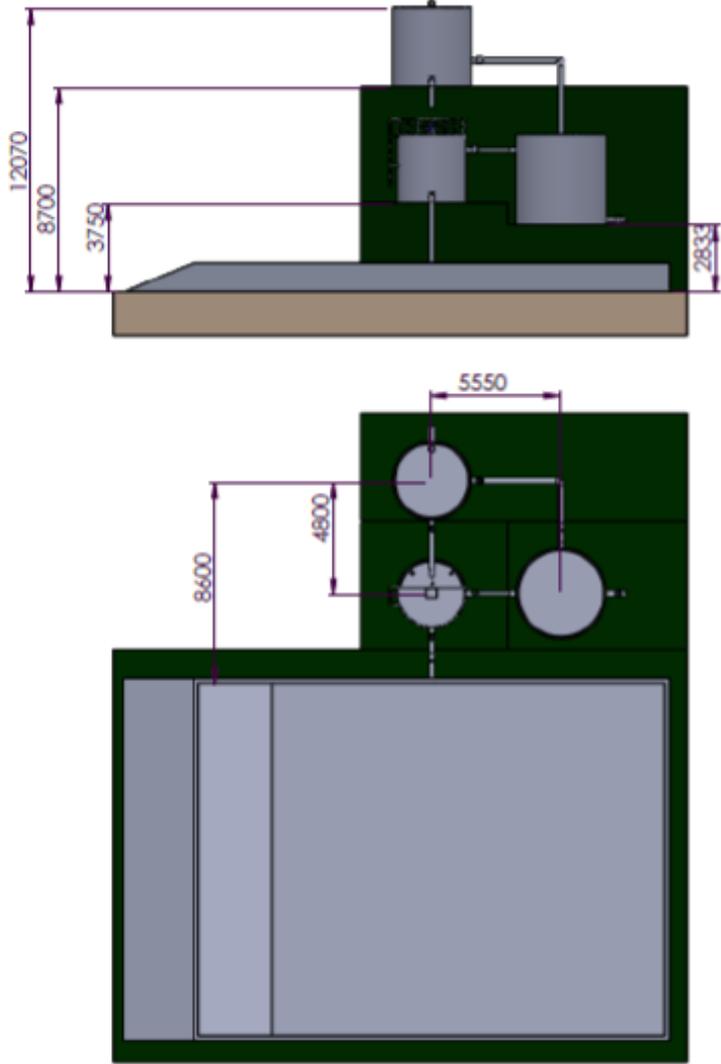
**ANEXO I: DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS**



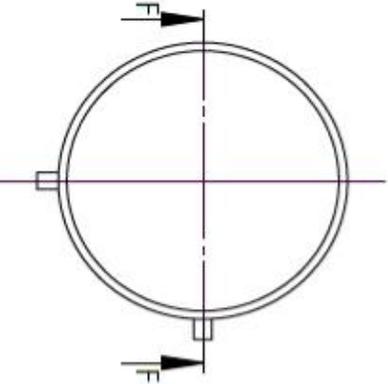
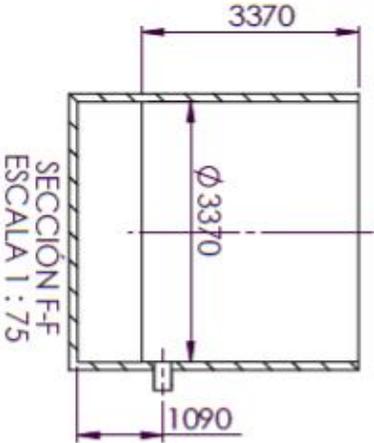
DETALLE H  
ESCALA 1 : 50

|              |                      |              |
|--------------|----------------------|--------------|
| 1            | IMPULSOR             | 5            |
| 1            | TANQUE CONTENEDOR    | 4            |
| 1            | SECADOR              | 3            |
| 1            | TANQUE AGITADOR      | 2            |
| 1            | TANQUE QUE ESPESADOR | 1            |
| N.º de Pieza | Denominación         | N.º de Orden |

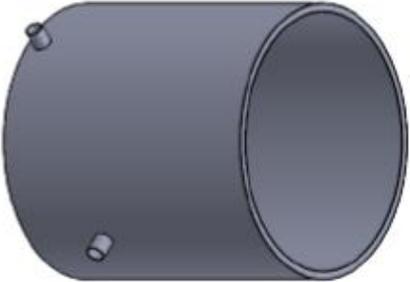
**ANEXO J: DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS (DIFERENTES ANGULOS DE VISTA)**



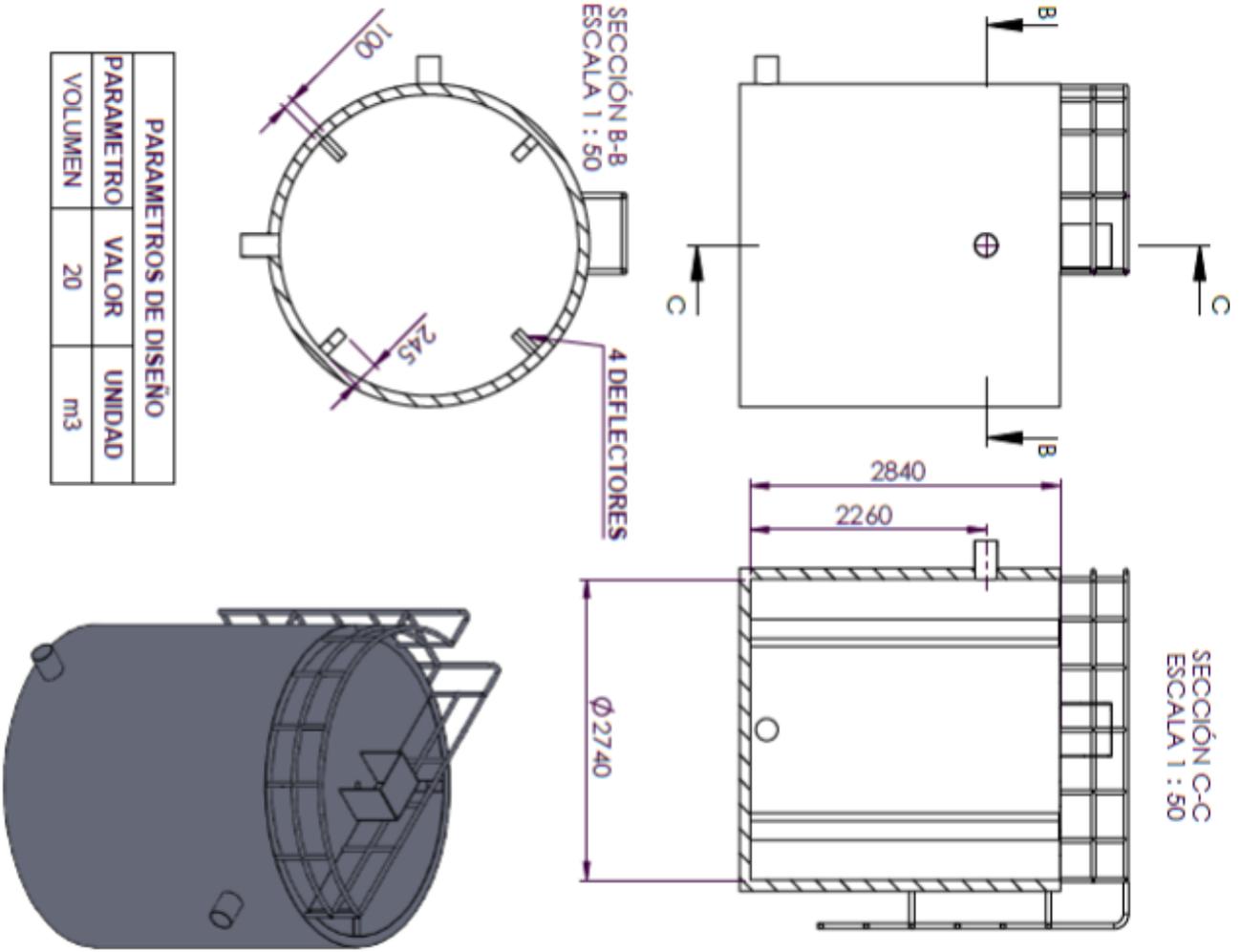
**ANEXO K: ESPECIFICACIONES DEL TANQUE MEZACLADOR**



| PARAMETROS DE DISEÑO |       |                |
|----------------------|-------|----------------|
| PARAMETRO            | VALOR | UNIDAD         |
| VOLUMEN              | 30    | m <sup>3</sup> |

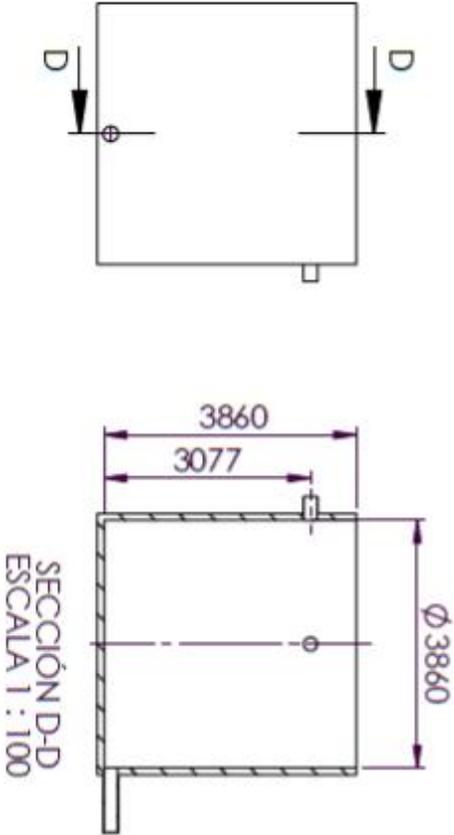
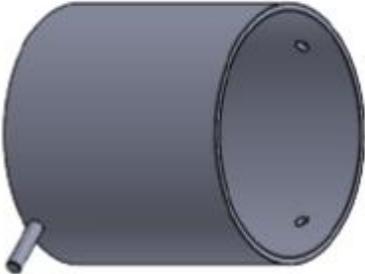


**ANEXO L: ESPECIFICACIONES DEL TANQUE AGITADOR**



**ANEXO M: ESPECIFICACIONES DEL TANQUE DE RECOLECCIÓN DE LIXIVIADOS**

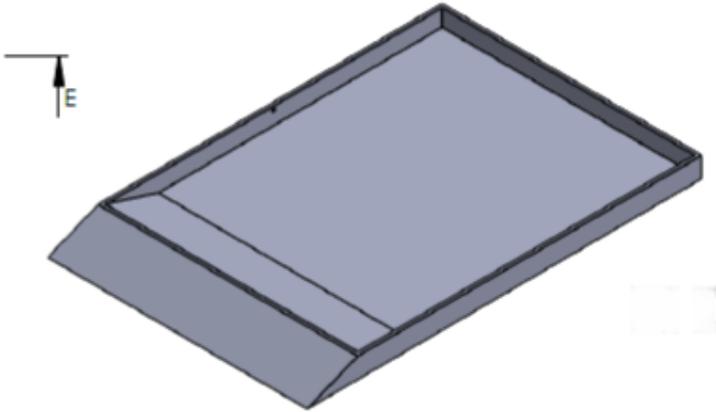
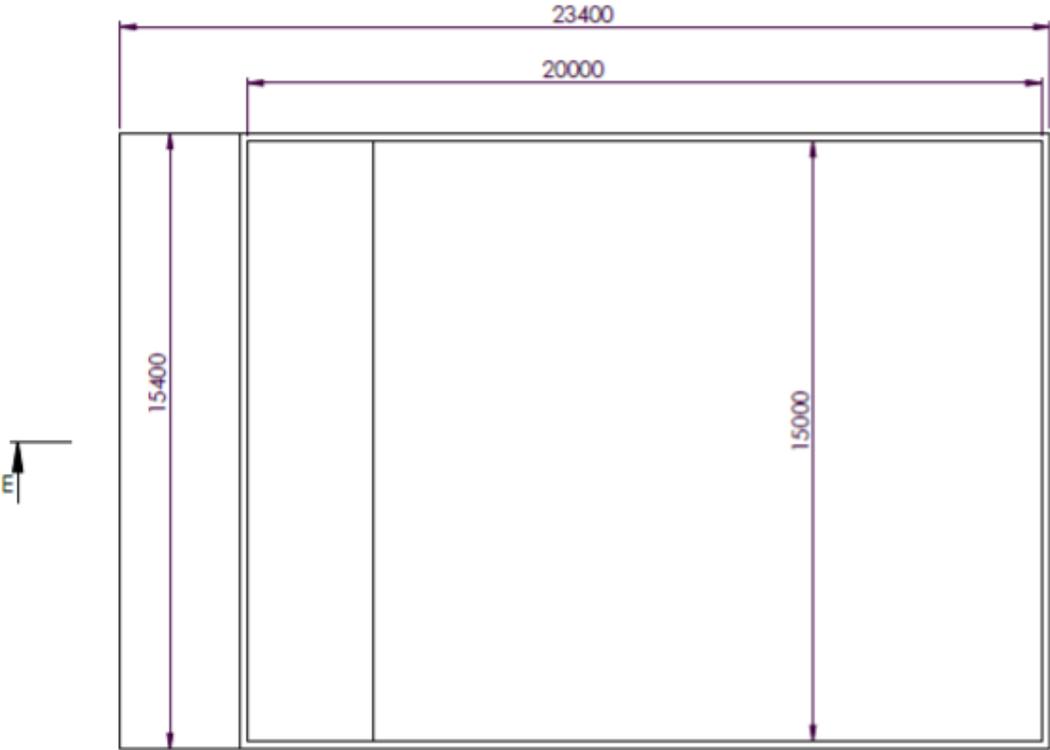
| PARAMETROS DE DISEÑO |       |                |
|----------------------|-------|----------------|
| PARAMETRO            | VALOR | UNIDAD         |
| VOLUMEN              | 45    | m <sup>3</sup> |



**ANEXO N: ESPECIFICACIONES DEL AREA DE SECADO**



| PARAMETROS DE DISEÑO |       |                |
|----------------------|-------|----------------|
| PARAMETRO            | VALOR | UNIDAD         |
| VOLUME DEL SECADO    | 277.5 | m <sup>3</sup> |
| VOLUMEN RAMPA        | 22.5  | m <sup>3</sup> |



## ANEXO O: ESPECIFICACIONES DEL AGITADOR Y SUS PALAS

