

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:
INGENIERÍA AMBIENTAL

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERAS AMBIENTALES

TEMA:
**EVALUACIÓN DE DIFERENTES TRATAMIENTOS FÍSICOS Y QUÍMICOS PARA REDUCIR
EL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LOS LODOS PROVENIENTES DE LA PTAR DE LA
INDUSTRIA ENVASADORA DE GAS DOMÉSTICO, ENI ECUADOR, EN LA PLANTA PIFO.**

AUTORAS:
LEÓN SALGUERO MARÍA JOSÉ
LÓPEZ LUDEÑA ANDREA KARINA

TUTOR:
XIMENA DEL ROCÍO BORJA VELA

Quito, octubre del 2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotras María José León Salguero con documento de identificación N° 050296534-6 y Andrea Karina López Ludeña con documento de identificación N° 110459715-6, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autoras del trabajo de titulación intitulado: EVALUACIÓN DE DIFERENTES TRATAMIENTOS FÍSICOS Y QUÍMICOS PARA REDUCIR EL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LOS LODOS PROVENIENTES DE LA PTAR DE LA INDUSTRIA ENVASADORA DE GAS DOMÉSTICO, ENI ECUADOR, EN LA PLANTA PIFO, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERAS AMBIENTALES, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autoras nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....

María José León Salguero
050296534-6



.....

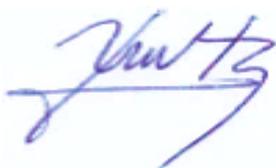
Andrea Karina López Ludeña
110459715-6

Quito, octubre 2020

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Trabajo Experimental, **EVALUACIÓN DE DIFERENTES TRATAMIENTOS FÍSICOS Y QUÍMICOS PARA REDUCIR EL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LOS LODOS PROVENIENTES DE LA PTAR DE LA INDUSTRIA ENVASADORA DE GAS DOMÉSTICO, ENI ECUADOR, EN LA PLANTA PIFO**, realizado por María José León Salguero y Andrea Karina López Ludeña, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, octubre del 2020



Ximena del Rocío Borja Vela
171122358-4

DEDICATORIA

Con mucha satisfacción, orgullo y agradecimiento yo María José León Salguero dedico en primer lugar a mis padres, *Ángel León* y *Susan Salguero* que con sacrificio y apoyo constante estuvieron en todo momento, con su insistencia y consideración acompañaron cada uno de mis pasos.

Con estas palabras quiero transmitir que culminar la carrera es una pequeña forma de agradecer cada palabra de aliento que aumentó mi motivación y deseos por enorgullecer por ello dedico mi trabajo a mis hermanos *Diego León* y *Paola León* que con su compañía hicieron de mis días más pesados los más amenos y agradables para continuar con mi estudio día tras día y a toda mi familia materna y paterna por su apoyo emocional y económico.

Quiero dedicar de forma especial a la persona más grandiosa e inigualable que jamás pude conocer, *Juan Carlos Paredes León* que con su humildad, carisma, perseverancia me demostró que a pesar de todas las dificultades que se puedan presentar, siempre existe una salida, eras quién siempre estuvo muy entusiasmado por verme avanzar un semestre tras otro, preguntándome siempre cuánto me falta y aunque no estés físicamente siempre te llevaré conmigo, porque eres un soldado que junto a mí siempre ha estado en cada batalla y por ello y más, te dedico este logro culminado mi eterno Pepito.

Dedico y agradezco a mi tía *Rocío Salguero*, a quien siempre he considerado cómo mi segunda madre, mi amiga, mi hermana, agradecer cada palabra de aliento y motivación por cada día anhelar el éxito y demostrar su orgullo hacia mí.

Quiero resaltar que este trabajo no se lo podría realizar de la mejor forma sin el apoyo de nuestra tutora **Ing. Ximena Borja**, quién supo darnos cada una de las pautas para continuar con cada proceso que parecía nunca acabar y que finalmente terminó en éxito.

Finalmente, me siento muy contenta de haber culminado ésta etapa de mi vida con grandiosas amistades dentro de la Universidad Politécnica Salesiana y fuera de la institución por cada palabra y cada consejo a: **Cristina Aguilar, Jessica Guamán, Carlos Cerón, Jhon Ramírez, Oscar Rojas, Cristhian Ávila, Sandy Ortiz, Josué Puma, Danilo Guerrero, Jessica Taipe, Jonathan Lincango, Diego Olmedo** y al equipo de fútbol **Espartanas F.C** por demostrar el significado de la verdadera amistad.

Yo, Andrea Karina López Ludeña, dedico mi trabajo de investigación:

A mi madre y hermano, Carmen y Leonardo:

Por haber sido el pilar más importante durante toda esta etapa de mi vida, mi cómplice y mi amiga, este triunfo te lo dedico a ti, para que te sientas orgullosa mami. Y a mi hermano por también haberme brindado tu ayuda para poder continuar con mis estudios.

A mis tíos, Diana y Freddy:

Porque ustedes han formado parte importante de este logro, porque cada plato de comida en su mesa y cada momento ameno en su hogar me ha dado impulso para continuar en mis estudios, convertirme en una profesional y devolverles más de lo que un día me han brindado.

A mis amigos:

A todos aquellos que he conocido a lo largo de mi vida, Carlos C., Karla L., Erika Q., Ronald C., José Luis C., Luis V., Pablo V., Kevin S., Nathaly R., Erika Q., Danilo G., Andrés V., Viviana C., sin importar si me falta alguno, con todos he compartido momentos de felicidad y tristeza a lo largo de estos años, me han dado su apoyo en los momentos difíciles y el impulso necesario para continuar.

AGRADECIMIENTO

Yo, María José León Salguero, quiero agradecer:

En primera instancia a la empresa ENI Ecuador S.A. y a cada uno de los profesionales que la representan por abrirnos las puertas y depositar su confianza en cada una de nosotras, empresa que ha permitido mejorar mi desarrollo en el ámbito profesional.

A la Universidad Politécnica Salesiana y a cada uno de los docentes que han guiado mi camino universitario para la excelente culminación de mi carrera como profesional.

A mi tutora de tesis, MsC. Ximena Borja, por brindar su tiempo, así como cada de uno de los consejos y observaciones para la correcta culminación del trabajo de titulación.

Finalmente expreso mi profundo agradecimiento por el apoyo incondicional a toda mi familia.

Yo, Andrea Karina López Ludeña, agradezco por su colaboración para la realización de este trabajo de investigación:

En primer lugar a la vida y a las elecciones que he tomado por que me han conducido a este preciso momento.

A la empresa Eni Ecuador S.A. por habernos facilitado el ingreso a la planta, compra de materiales y análisis del lodo de la PTAR de la Planta Pifo.

Al Dr. Fabián Urbina por el apoyo total que me brindó en cada accionar para la realización de este trabajo de investigación, y por cada consejo que me acompañan desde el momento en el que me los brindó hasta la actualidad.

A la Ing. Amanda Rosero por el acompañamiento y la facilidad brindada para la realización de gestiones internas dentro de la empresa.

Al Abg. Marcelo Palacios por haberme brindado su apoyo desde el primer momento en que lo conocí, de no haber sido por su ayuda, no podría vivir este momento.

A la MsC. Ximena Borja, por asistirnos en cada tutoría para la realización de este trabajo.

A la Universidad Politécnica Salesiana por tal muestra de espíritu salesiano, dando siempre el ejemplo.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	7
2.1. Objetivo General	7
2.2 Objetivos Específicos.....	7
3. MARCO TEÓRICO	8
3.1. Producción de cilindros con GLP para uso doméstico e industrial.....	8
3.2. Planta de Tratamiento de Agua Residual	9
3.2.1. Caudal de agua residual y lodo.....	9
3.3. Gestor ambiental	10
3.4. Análisis CRETIB	11
3.4.1. Resultados de análisis CRETIB.....	12
3.4.1.1. pH.....	12
3.4.1.2. Reacción con agua.	12
3.4.1.3. Reacción con ácido.	12
3.4.1.4. Reacción con álcali.	12
3.4.1.5. Generación de HCN.....	12
3.4.1.6. Generación de H ₂ S.	13
3.4.1.7. Reacción o descomposición detonante o explosiva.	13
3.4.1.8. Capaz de provocar fuego si no es líquido.	13
3.4.1.9. Arsénico.	13
3.4.1.10. Bario.....	13
3.4.1.11. Cadmio.....	13
3.4.1.12. Cromo total.	13
3.4.1.13. Mercurio.....	14

3.4.1.14. Plata.....	14
3.4.1.15. Plomo.....	14
3.4.1.16. Selenio.....	14
3.4.1.17. Ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D).....	14
3.4.1.18. Ácido 2,4,5-triclorofenoxipropiónico (silvex).....	14
3.4.1.19. Clordano.....	15
3.4.1.20. O-Cresol.....	15
3.4.1.21. M-Cresol.....	15
3.4.1.22. P-Cresol.....	15
3.4.1.23. Cresol.....	15
3.4.1.24. 2,4-Dinitrotolueno.....	15
3.4.1.25. Endrin.....	15
3.4.1.26. Heptacloro.....	15
3.4.1.27. Heptacloro epóxido.....	15
3.4.1.28. Hexacloroetano.....	16
3.4.1.29. Lindano.....	16
3.4.1.30. Metoxicloro.....	16
3.4.1.31. Nitrobenceno.....	16
3.4.1.32. Pentaclorofenol.....	16
3.4.1.33. Toxafeno.....	16
3.4.1.34. 2,4,5-Triclorofenol.....	16
3.4.1.35. 2,4,6-Triclorofenol.....	17
3.4.1.36. Benceno.....	17
3.4.1.37. Clorobenceno.....	17
3.4.1.38. Cloroformo.....	17

3.4.1.39. Cloruro de vinilo	17
3.4.1.40. 1,4-Diclorobenceno.....	18
3.4.1.41. 1,2-Dicloroetano.	18
3.4.1.42. 1,1-Dicloroetileno.....	18
3.4.1.43. Hexaclorobenceno.....	19
3.4.1.44. Hexaclorobutadieno.	19
3.4.1.45. Metil etil cetona.	19
3.4.1.46. Piridina.....	19
3.4.1.47. Tetracloroetileno	20
3.4.1.48. Tetracloruro de carbono.	20
3.4.1.49. Tricloroetileno.....	20
3.5. Normativa legal aplicable.....	21
3.6. Componentes del GLP	24
3.6.1. Propano.....	24
3.6.2. Propeno.....	24
3.6.3. Butano.....	24
3.6.4. Buteno.....	24
3.7. Clasificación de lodos	25
3.7.1. Lodos primarios.....	25
3.7.2. Lodos secundarios	25
3.7.3. Lodos mixtos	25
3.7.4. Lodos químicos	25
3.8. Tipos de tratamientos	26
3.8.1. Espesamiento	26
3.8.1.1. Espesamiento por gravedad.	26

3.8.1.2. Espesamiento por centrifugación.....	26
3.8.1.3. Espesamiento por filtro de banda.....	26
3.8.2. Procesos fisicoquímicos	27
3.8.2.1. Floculación.....	27
3.8.2.2. Estabilización con cal.	28
3.8.2.3. Acondicionamiento químico.....	28
3.8.3. Deshidratación	31
3.8.3.1. Secado solar.	31
3.8.3.2. Lechos de secado.	33
3.8.3.3. Filtración al vacío.	35
3.8.3.4. Filtro prensa.	35
3.8.3.5. Combustión controlada.	36
3.8.4. Combinación de varios métodos.....	36
4. MATERIALES Y MÉTODOS	39
4.1. Localización	39
4.2. Población y muestra de estudio.....	40
4.2.1. Población	40
4.2.2. Muestra	40
4.3. Tratamientos.....	40
4.3.1. Secado solar o secado por convección natural	41
4.3.1.1. Materiales.....	43
4.3.2. Filtración.....	43
4.3.2.1. Materiales.....	45
4.3.3. Acondicionamiento químico	45
4.3.3.1. Materiales.....	46

4.4. Metodología experimental.....	46
4.4.1. Contenido de humedad	46
4.4.1.1. Materiales y equipos	47
4.4.2. Sólidos totales, fijos y volátiles	47
4.4.2.1. Materiales y equipos	48
4.4.3. Tasa de evaporación	49
4.4.4. Tasa de filtración	50
4.4.5. Composición granulométrica.....	50
4.4.5.1. Materiales y equipos	51
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
5.1. Características del lodo	52
5.1.1. Contenido de humedad	52
5.1.2. Sólidos totales:.....	53
5.1.3. Sólidos volátiles:	53
5.1.4. Sólidos fijos:.....	53
5.1.5. Viscosidad	53
5.1.6. Gravedad API	54
5.1.7. BS&W	54
5.1.8. pH	55
5.1.9. Oxígeno disuelto.....	55
5.2. Evaluación de los tratamientos.....	56
5.2.1. Secado solar.....	56
5.2.1.1. Curva granulométrica.....	69
5.2.2. Filtración.....	70
5.2.3. Acondicionamiento químico	78
5.2.4. Análisis estadístico de resultados	86

5.2.4.1. ANOVA de dos factores con varias muestras por grupo.....	87
5.2.4.2. ANOVA de todos los tratamientos y test de Tukey.....	90
5.2.5. Dimensionamiento.....	96
5.2.5.1. Tratamiento de acondicionamiento químico.....	96
5.2.5.2. Tratamiento de secado solar.....	99
5.2.6. Estudio de sostenibilidad económico, técnico y social	99
5.2.7. Análisis de costo de construcción, operación y mantenimiento.....	101
5.2.7.1. Construcción	101
5.2.7.2. Operación.....	101
5.2.7.3. Mantenimiento	101
5.3. Discusiones.....	102
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	108
6.1. Conclusiones	108
6.2. Recomendaciones.....	109
7. BIBLIOGRAFÍA	110
8. ANEXOS	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de desechos procedentes de todas las fases y operaciones	23
Tabla 2. Resumen de los tratamientos estudiados según la localidad donde fueron realizados	41
Tabla 3. Equipos y materiales usados para análisis de contenido de humedad	47
Tabla 4. Equipos y materiales usados para análisis de sólidos totales, fijos y volátiles	48
Tabla 5. Materiales y equipos usados para determinación de composición granulométrica ..	51
Tabla 6. Resultados de análisis BS&W	55
Tabla 7. Condiciones climáticas en localización 1 en el tratamiento de secado solar	56
Tabla 8. Condiciones climáticas en localización 2 en el tratamiento de secado solar	57
Tabla 9. Masas diarias de cajones (kg) en la localización 1, tratamiento de secado solar.....	58
Tabla 10. Masas diarias de cajones (kg) en la localización 2, tratamiento de secado solar....	58
Tabla 11. Masa evaporada (kg) en localización 1, tratamiento de secado solar	63
Tabla 12. Masa evaporada (kg) en localización 2, tratamiento de secado solar	63
Tabla 13. Tasas de evaporación (g/m ² x minuto) en localización 1, tratamiento de secado solar	66
Tabla 14. Tasas de evaporación (g/m ² x minuto) en localización 2, tratamiento de secado solar	66
Tabla 15. Contenido de humedad final localización 1, tratamiento de secado solar	68
Tabla 16. Contenido de humedad final localización 2, tratamiento de secado solar	68
Tabla 17. Análisis de composición granulométrica	69
Tabla 18. Mililitros filtrados en localización 1	71
Tabla 19. Mililitros filtrados en localización 2	71
Tabla 20. Tasas de filtración (m ³ / m ² x hora) obtenidas en localización 1	75
Tabla 21. Tasas de filtración (m ³ / m ² x hora) obtenidas en localización 2.....	75

Tabla 22. Contenido de sólidos totales, fijos y volátiles localización 1	76
Tabla 23. Contenido de sólidos totales, fijos y volátiles localización 2	76
Tabla 24. Contenido de humedad final localización 1, tratamiento de filtración	77
Tabla 25. Contenido de humedad final localización 2, tratamiento de filtración	77
Tabla 26. Condiciones climáticas obtenidas en localización 2 en el tratamiento de acondicionamiento químico	78
Tabla 27. Concentraciones de cal	79
Tabla 28. Masas diarias de cajones (kg) en localización 2 en el tratamiento de acondicionamiento químico	79
Tabla 29. Masa evaporada de cajones con respecto al peso inicial en localización 2 en tratamiento de acondicionamiento químico	83
Tabla 30. Tasas de evaporación ($\text{g/m}^2 \times \text{minuto}$), tratamiento de acondicionamiento químico localización 2	84
Tabla 31. Concentraciones de cal y tasas de evaporación ($\text{g/m}^2 \times \text{minuto}$) obtenidas	84
Tabla 32. Contenido de humedad final en localización 2 del tratamiento de acondicionamiento químico	85
Tabla 33. Resumen de tratamientos VS localización.....	87
Tabla 34. Resultados de análisis de varianza de dos factores	88
Tabla 35. Abreviaciones usadas en el Análisis estadístico en Rstudio.....	91
Tabla 36. Resultados de análisis de rangos en Infostat a partir de una prueba Tukey.....	93
Tabla 37. Contenido de humedad final de tratamiento de secado solar y acondicionamiento químico	95
Tabla 38. Análisis de costos de construcción	101
Tabla 39. Análisis de costos de operación	101
Tabla 40. Análisis de costos de mantenimiento.....	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la PTAR de la Planta Pifo ENI Ecuador S.A.	10
Figura 2. Comportamiento de humedad de lodos con diferentes concentraciones de cal	30
Figura 3. Sistema de secado natural.....	31
Figura 4. Curva de secado solar con cubierta.	32
Figura 5. Curva de secado solar en invernadero.	32
Figura 6. Corte de un lecho de secado	33
Figura 7. Comportamiento de la deshidratación de lodos bajo cubierta en PTAP Checa	34
Figura 8. Comportamiento de la deshidratación de lodos dentro de invernadero en PTAP Checa.....	34
Figura 9. Localización de la Planta Pifo Eni Ecuador	39
Figura 10. Esquema de cajones de madera para el tratamiento de secado solar.....	42
Figura 11. Esquema de filtros	44
Figura 12. Masas diarias de cajones (kg) en localización 1, tratamiento de secado solar	59
Figura 13. Masas diarias de cajones (kg) en localización 2, tratamiento de secado solar	59
Figura 14. Masas promedio (kg) y temperaturas máximas (°C) en localización 1, tratamiento de secado solar.	60
Figura 15. Masas promedio (kg) y temperaturas máximas (°C) en localización 2, tratamiento de secado solar	60
Figura 16. Masa promedio de cajones en localización 1	61
Figura 17. Masa promedio de cajones en localización 2	61
Figura 18. Masas obtenidas (kg) en ambas localizaciones, tratamiento de secado solar	62
Figura 19. Masa evaporada (kg) en promedio y de cada cajón localización 1, tratamiento de secado solar	64

Figura 20. Masa evaporada (kg) en promedio y de cada cajón localización 2, tratamiento de secado solar.....	65
Figura 21. Tasas de evaporación obtenidas de ambas localizaciones.....	67
Figura 22. Comparación de resultados obtenidos de contenido de humedad inicial y final en tratamiento de secado solar de ambas localizaciones	68
Figura 23. Curva granulométrica.....	69
Figura 24. Mililitros obtenidos de cada filtro de localización 1 en tratamiento de filtración.....	72
Figura 25. Mililitros filtrados en promedio obtenidos de tratamiento de filtración en localización 1	72
Figura 26. Mililitros obtenidos de cada filtro de localización 2 en tratamiento de filtración.....	73
Figura 27. Mililitros filtrados en promedio obtenidos de tratamiento de filtración en localización 2	73
Figura 28. Comparación de mL filtrados entre ambas localizaciones.....	74
Figura 29. Comparación de resultados iniciales de sólidos totales, fijos y volátiles y post tratamiento para localización 1	76
Figura 30. Comparación de resultados obtenidos de contenido de humedad inicial y final en tratamiento de filtración de ambas localizaciones	78
Figura 31. Masas diarias de cajones (kg) en localización 2 en el tratamiento de acondicionamiento químico.....	80
Figura 32. Masas promedio (kg) y temperaturas máximas (°C) en localización 2 en tratamiento de acondicionamiento químico	81
Figura 33. Masa promedio de cajones en localización 2, con acondicionamiento químico...81	
Figura 34. Comparación entre masas obtenidas de tratamiento de secado solar y de acondicionamiento químico.....	82
Figura 35. Masa evaporada (kg) en promedio y de cada cajón de localización 2 en tratamiento	

de acondicionamiento químico	83
Figura 36. Comparación de contenido de humedad inicial con resultados obtenidos de contenido de humedad final en el tratamiento de secado solar y tratamiento de acondicionamiento químico	85
Figura 37. Resultados obtenidos ANOVA en Rstudio del contenido de humedad final.....	91
Figura 38. Diagrama de caja de contenido de humedad final de cada tratamiento.	92
Figura 39. Resultados de la prueba de Tukey	93
Figura 40. Gráfica de la prueba de tukey.....	94
Figura 41. Vista superior cajones de acondicionamiento químico.	97
Figura 42. Vista lateral cajones de acondicionamiento químico.	98
Figura 43. Vista en perspectiva de cajones para acondicionamiento químico.	98

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Reacción de óxido de calcio con agua	29
Ecuación 2 Ley de Stokes	37
Ecuación 3 Contenido de humedad.....	46
Ecuación 4 Sólidos totales	48
Ecuación 5 Sólidos fijos.....	48
Ecuación 6 Sólidos volátiles	48
Ecuación 7 Área de un cuadrado.....	49
Ecuación 8 Tasa de evaporación.....	49
Ecuación 9 Área de un círculo	50
Ecuación 10 Tasa de filtración.....	50
Ecuación 11 Gravedad específica	54
Ecuación 12 Volumen de un cubo	96

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Matriz de resultados finales de tratamiento	117
Anexo 2. Informe de resultados laboratorio ALS.....	118
Anexo 3. Informe de resultados laboratorio Umwelt	122
Anexo 4. Análisis CRETIB lodos de la PTAR ENI Ecuador S.A.....	125
Anexo 5. Imágenes satelitales de las ubicaciones a) Sangolquí, Valle de los Chillos b) Pujilí	130
Anexo 6. Almacenamiento de cilindros con lodos de la PTAR	130
Anexo 7. Cajones con lodo tratamiento de secado solar localidad 1 y 2.....	131
Anexo 8. Análisis de contenido de humedad, crisoles dentro de estufa y desecador.....	132
Anexo 9. Evaporación de muestras para análisis de sólidos totales, fijos y volátiles	133
Anexo 10. Análisis de composición granulométrica	134
Anexo 11. Tratamiento de acondicionamiento químico al inicio y finalización respectivamente	134
Anexo 12. Tratamiento de filtración en localidad 2	135
Anexo 13. Determinación del pH de la muestra de estudio en instalaciones de la UPS	136
Anexo 14. Toma de muestras para análisis de contenido de humedad del tratamiento de secado solar y acondicionamiento químico respectivamente	137
Anexo 15. Evidencia estado final del tratamiento de filtración, específicamente filtro N° 10	138
Anexo 16. Factura de compra de cal viva.....	139
Anexo 17. Script de Rstudio utilizado para el análisis de varianza y test de Tukey	139

RESUMEN

La empresa Eni Ecuador S.A. opera en el mercado de comercialización de Gas Licuado de Petróleo (por sus siglas GLP), en el sector doméstico, industrial y comercial. Esta compañía posee cuatro plantas de envasado de GLP, las cuales se ubican en Pifo, Ibarra, Ambato e Isidro Ayora, siendo la más grande de estas la planta Pifo.

La planta Pifo cumple con toda la normativa ambiental vigente tanto del Ministerio del Ambiente del Ecuador como de las normativas ISO que la empresa posee (ISO 9001, ISO 14001, entre otras) (ENI , 2019), debido a esto la mejora continua del Sistema de Gestión Ambiental es imprescindible, es por ello que la presente investigación está enfocada en la optimización de los recursos, se reducirá el costo del tratamiento final del lodo generado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la planta Pifo, mediante la deshidratación del mismo para lograr una disminución de su volumen y peso total lo cual permitirá además una mayor facilidad en su transporte.

Se evaluaron dos tratamientos físicos y uno químico para la deshidratación del lodo producido en la PTAR. Los tratamientos físicos analizados fueron secado solar o por convección natural y filtración con capas de geotextil y grava. Para el químico, se realizó el acondicionamiento del lodo con óxido de calcio CaO comúnmente conocido como cal viva, previo a su secado por convección natural al igual que el primer tratamiento físico mencionado.

En la presente investigación la variable de estudio fue la cantidad de humedad presente en los lodos al finalizar la fase de experimentación. Mediante un análisis estadístico se determinó el tratamiento que presente una mayor reducción del contenido de humedad. Se realizó un análisis socio económico para la utilización de este y, por último, se procedió a dimensionar en AutoCAD su modelo a escala real.

ABSTRACT

The company Eni Ecuador S.A. operates in the Liquefied Petroleum Gas (LPG) commercialization market, in the domestic, industrial and commercial sectors. This company has four LPG packaging plants, which are located in Pifo, Ibarra, Ambato and Isidro Ayora, the largest of these being the Pifo plant.

The Pifo plant complies with all current environmental regulations of both the Ministry of the Environment of Ecuador and the ISO regulations that the company has (ISO 9001, ISO 14001, among others) (ENI , 2019), due to this the continuous improvement of the System Environmental Management is essential, that is why this research is focused on optimizing resources, it will reduce the cost of the final treatment of the sludge generated in the Waste Water Treatment Plant (WWTP) of the Pifo plant, through the dehydration of the same to achieve a decrease in its volume and total weight which will also allow for greater ease of transport.

Two physical and one chemical treatment were evaluated for the dehydration of the sludge produced in the WWTP. The physical treatments analyzed were solar drying or by natural convection and filtration with layers of geotextile and gravel. For the chemist, the sludge was conditioned with calcium hydroxide CaO, commonly known as quicklime, prior to drying by natural convection, as was the first mentioned physical treatment.

In the present investigation, the study variable was the amount of moisture present in the sludge at the end of the experimentation phase. By means of a statistical analysis, the treatment with the greatest reduction in moisture content was determined. A socio-economic analysis was carried out for its use and, finally, its full-scale model was dimensioned in AutoCAD.

SIGLAS Y ABREVIATURAS

ANOVA

Analysis Of Variance

API

American Petroleum Institute

AQ

Acondicionamiento Químico

BS&W

Basic Sediment and Water

CRETIB

Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico ambiental, Inflamable y Biológico-infeccioso

EPA

Environmental Protection Agency

FL1

Filtración en Localización 1

FL2

Filtración en Localización 2

GLP

Gas Licuado de petróleo

HCBD

Hexaclorobutadieno

INAMHI

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

ISO

International Organization for Standardization

pH

Potencial Hidrógeno

PTAP

Planta de tratamiento de Agua Potable

PTAR

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

PVC

Policloruro de vinilo

SSL1

Secado Solar en Localización 1

SSL2

Secado Solar en Localización 2

1. INTRODUCCIÓN

Desde que se inició la comercialización del GLP en Ecuador este se convirtió en un producto de primera necesidad, mejorando la calidad de vida de los habitantes, dado que disminuyó el consumo de gasolina y kerex, productos que se utilizaban tradicionalmente para la cocción de alimentos (Cedeño y Villacrés, 2013).

“El GLP se comercializa en Ecuador desde finales de 1955 a través de la empresa italiana DOMOGAS S.A.” (Cedeño y Villacrés, 2013), convirtiéndose en un producto de gran consumo para los ecuatorianos desde ese mismo año, más tarde en 1973 el Estado asumió la responsabilidad de comercializarlo en todo el país (Cedeño y Villacrés, 2013).

“Aproximadamente, el 90% de la población lo utiliza, mayoritariamente en sus actividades de cocción de alimentos, pero también un número cada vez mayor de la población lo emplea en el calentamiento de agua a través de calefones para aseo personal” (Cedeño y Villacrés, 2013), debido a que su precio es más bajo que el de la electricidad a causa del subsidio brindado por el gobierno del Ecuador, por ejemplo en países como Argelia el precio para el GLP es de 0.07 USD por litro, en Francia es de 0.97 USD por litro y en Suecia es de 1 USD por litro, como regla general se observa que, los países más desarrollados tienen los precios más altos, mientras que los países en vías de desarrollo y los que producen y exportan gas natural tienen costos significativamente más bajos. Las diferencias de precios entre países se deben a los diferentes impuestos y subsidios para el GLP (Global Petrol Prices, 2020).

“Actualmente EP Petroecuador abastece de combustible a las compañías comercializadoras a través de las Gerencias de Transporte y Almacenamiento de Comercialización, con producto proveniente de producción propia de las refinerías y de importaciones” (Cedeño y Villacrés, 2013).

En la actualidad existen 17510643 habitantes en el Ecuador (INEC, 2020) por lo cual la demanda que tiene la industria del GLP es muy alta, siendo abastecida en su mayoría por la empresa ENI Ecuador S.A., la cual opera en el servicio de comercialización de GLP de tipo doméstico, comercial e industrial desde hace más de 50 años. Sus actividades se desarrollan en todo el territorio nacional, satisfaciendo las necesidades energéticas de las regiones: Costa, Sierra, Oriente e Insular. Además, cuenta con cuatro plantas de envasado de GLP, de las cuales la de mayor importancia en virtud de su gran capacidad de producción de cilindros se encuentra en Pifo, que es específicamente donde se desarrolló la presente investigación.

El proceso productivo de la empresa ENI Ecuador S.A involucra una serie de pasos, donde luego de la distribución y venta de cilindros llenos de GLP, éstos se reincorporan vacíos a la planta envasadora de gas en Pifo, ahí son sometidos a un lavado con agua a presión para limpiarlos por dentro en un proceso llamado “inertización de cilindros”, luego son colocados en una banda transportadora y pasan al taller de reparación únicamente aquellos que se encuentran defectuosos, estos son separados manualmente de la línea principal de cilindros para ser soldados o enderezados en caso de ser necesario y después ser reconducidos nuevamente al proceso siguiente; los demás son guiados hacia el interior de la máquina granalladora la cual se encarga de remover por fricción la pintura de todos los cilindros, seguidamente se les coloca una nueva capa de pintura y también se les imprime el peso exacto de cada cilindro vacío, para luego volver a ser llenados con GLP ,ser comercializados y reutilizados nuevamente.

Como parte del tratamiento de sus aguas residuales, la empresa posee una PTAR, la misma que utiliza un sistema de coagulación-floculación empleando poliacrilamida aniónica (nombre comercial: A 100) a razón de 30 litros, al igual que 2.5 litros de hipoclorito de calcio al 70% y 3 libras de óxido de calcio (cal) para tratar 14 m³ de agua residual.

Lo que a su vez determina la formación de una gran cantidad de lodos con un alto contenido de humedad al igual que aceites y grasas derivadas del petróleo, lo cual le confiere propiedades inflamables, estos son almacenados dentro de cilindros metálicos, con una producción de 19800 galones anuales.

Como parte del cumplimiento del Plan de Manejo Ambiental la empresa gestiona el lodo producido con un gestor ambiental certificado por la Autoridad Ambiental Nacional (Ministerio del Ambiente) debido a que es considerado un residuo peligroso puesto que como se mencionó previamente posee una gran cantidad de hidrocarburos lo cual lo hace inflamable. El gestor ambiental es el único a cargo de brindarles un tratamiento adecuado a los lodos puesto que no se les puede dar una disposición final simple tal como se haría con residuos comunes, esto es mencionado específicamente en el Acuerdo Ministerial 061 en su art. 79. En este caso el gestor procede a incinerarlos controladamente y a continuación debe documentar mediante un “certificado de destrucción” que los lodos fueron tratados adecuadamente, el certificado además incluye el costo de este tratamiento final y un formulario donde se especifican las cantidades (en kilogramos) de lodo que fueron tratados.

Los lodos que salen como producto de la PTAR poseen un alto contenido de humedad en su composición (Chavez, 2012), esto representa un problema importante, puesto que involucra gastos económicamente considerables para la empresa.

En consecuencia, a lo descrito, se buscó y estudió un tratamiento para reducir el contenido de humedad con el fin de obtener un lodo con menor volumen y peso, lo que permitirá generar un ahorro económico en beneficio de la empresa, puesto que se disminuirá el costo del procedimiento realizado por el gestor ambiental encargado de eliminar adecuadamente este residuo peligroso.

Como primer paso dentro de la presente investigación se realizó el análisis de las muestras de lodo para determinar sus características iniciales tales como oxígeno disuelto, sólidos totales, sólidos fijos, sólidos volátiles, pH y contenido de humedad.

Se plantearon diferentes tratamientos físicos y químicos que fueron analizados y comparados posteriormente. Como parte de los tratamientos físicos constan: secado solar y filtración, y dentro del tratamiento químico se encuentra el uso de óxido de calcio (CaO) como acondicionamiento previo al secado solar.

Se realizaron diez repeticiones dentro del tratamiento de secado solar y filtración, y 5 repeticiones para el acondicionamiento químico, con el objetivo de analizar los resultados finales en función de su contenido de humedad y se obtuvo una matriz de datos que fue analizada estadísticamente con Rstudio. Los ensayos fueron situados en 2 localidades diferentes, en lugar de Pifo debido a las dificultades logísticas presentadas a causa de la pandemia del coronavirus para poder desempeñar la parte experimental de la presente investigación.

Para el estudio del secado solar se realizaron pruebas en las cuales aproximadamente 2 litros de lodo de la PTAR fueron colocados dentro de cajones de madera de dimensiones 30 cm de largo x 30 cm de ancho, cabe mencionar que fueron colocados bajo una cubierta que se encontraba a 70 cm de altura, con fines de ventilación y protección contra la lluvia. Se evaluó la tasa de evaporación diaria mediante la medición de la pérdida de masa de cada cajón bajo las condiciones meteorológicas presentadas en ambas localizaciones, mismas que también fueron monitoreadas diariamente durante todo el proceso, el fin del proceso de deshidratación en el tratamiento del secado solar fue determinado cuantitativamente al obtener un peso constante en los cajones.

En el caso del tratamiento por filtración se realizó la separación del contenido de agua mediante el uso de geotextil no tejido y grava como medios filtrantes dentro de un tubo de PVC, las muestras de lodo fueron colocadas en el filtro con lo cual las capas mencionadas anteriormente se encargaron de retener los sólidos dejando circular el exceso de agua, en estos ensayos se midió la tasa de filtración diaria, así como el contenido de sólidos totales fijos y volátiles.

Finalmente se evaluó el acondicionamiento químico con el uso de cal viva (CaO) previo a un secado solar. Se encontró bibliográficamente dosificaciones utilizadas comúnmente para este proceso y con el fin de evaluar la dosis óptima para la reducción del contenido de humedad de este residuo, se procedió a realizar 5 repeticiones con concentraciones diferentes de óxido de calcio, las cuales fueron 20%, 40%, 60%, 80% y 100% con respecto al peso del lodo. Con el fin de poder comparar el tratamiento de secado solar simple con este tratamiento en el cual se utiliza un reactivo químico como acondicionante, se procedió a colocar los lodos con óxido de calcio incorporado, en cajones de las mismas dimensiones a los usados en el primer tratamiento y también fueron colocados bajo una cubierta para evitar que estos sean humedecidos por la lluvia.

Durante el desarrollo de este tratamiento se determinó la tasa de evaporación y se monitoreó diariamente las condiciones climáticas presentadas durante todo el proceso de secado, cabe mencionar que inmediatamente después de agregar el contenido de cal en diferentes cantidades en cada uno de los cajones se procedió a homogenizar la mezcla y se evidenció la reducción de líquido presente en el lodo, presencia de coloración amarillenta-verdosa, así como olores fuertes.

Al igual que en el tratamiento de secado solar simple, se consideró por terminado el proceso de evaporación una vez que las masas de cada cajón se volvieron constantes.

Con este tipo de tratamiento se espera conseguir resultados de deshidratación en un periodo de tiempo corto y porcentaje de contenido de humedad más bajos a los del tratamiento de secado solar y filtración.

Es importante recalcar que en todos los resultados de los tratamientos mencionados se midió el contenido de humedad final y se reportó datos dentro de una matriz de Excel los cuales se encuentran dentro del *Anexo 1*.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

- Evaluar diferentes alternativas de tratamientos físicos y químicos para los lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales de la envasadora de gas doméstico ENI Ecuador planta Pifo, para el diseño del tratamiento más eficiente en la remoción de humedad a partir de resultados de laboratorio preliminares.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el lodo proveniente de la PTAR de la industria envasadora de gas para la correcta elección de la unidad a implementar.
- Evaluar distintos tratamientos aplicados a escala laboratorio para reducir la humedad en los lodos.
- Diseñar el sistema de tratamiento que presente mejores resultados.
- Realizar un estudio de sostenibilidad económico, técnico y social.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Producción de cilindros con GLP para uso doméstico e industrial

Su proceso productivo inicia con la recolección de los cilindros vacíos que fueron usados y devueltos por los usuarios, más adelante se los procede a inertizar mediante un lavado interno con agua a presión con la finalidad de que se remueva cualquier residuo que pueda causar riesgo de inflamabilidad en los demás procesos.

Posteriormente se comprueba que no existan fugas o que su estructura no presente corrosión o hendiduras, en el caso de encontrarse daños irreparables son descartados y almacenados para que luego sean gestionados como chatarra; aquellos que no han presentado fallas importantes son llevados al taller de pintura y reparación donde son nuevamente pintados y soldados en caso de necesitar una nueva base o aza, después se les estampa a cada uno en su fachada el peso del cilindro vacío, a continuación son llevados a la nave de envasado donde se les coloca a cada uno la cantidad necesaria de GLP hasta completar los 30 kg, enseguida son sellados con tapas de polietileno de alta densidad e inmediatamente son inspeccionados nuevamente. Por último, se los colocan en camiones transportadores los cuales se encargan de entregar los cilindros llenos a las distribuidoras oficiales de Agip Ecuador. Esta planta distribuye 1200 cilindros al día, los cuales sirven para abastecer a la provincia de Pichincha.

3.2. Planta de Tratamiento de Agua Residual

Como resultado del proceso productivo de esta empresa se generan aproximadamente 45 m³ por día de agua residual la cual al contener compuestos derivados del petróleo posee una gran cantidad de hidrocarburos debido a esto su tratamiento primario consta de 3 cámaras API, el afluente de la PTAR difícilmente cuenta con nutrientes y materia orgánica de fácil biodegradación que permita la proliferación de bacterias (Chavez, 2012), disponen de análisis de laboratorio por lo cual no se realiza ningún tratamiento biológico, la depuración finaliza con el sometimiento del afluente al proceso de coagulación-floculación y conjuntamente se adiciona cal y cloro para su desinfección. Al finalizar este proceso cerca de 50 m³ diarios de agua tratada es recirculada hacia el proceso de inertización donde es utilizada nuevamente para el lavado interno de los cilindros vacíos, pero el tratamiento también produce 1500 kg mensuales de lodo residual.

3.2.1. Caudal de agua residual y lodo

El cálculo del caudal mensual se obtuvo en base a datos brindados por la empresa y se presenta a continuación:

El cálculo del caudal de agua residual por hora se basó en el horario de trabajo que la empresa tiene para el taller donde se realiza el proceso de lavado de cilindros, el cual es de 7 :00 a 15:30 :

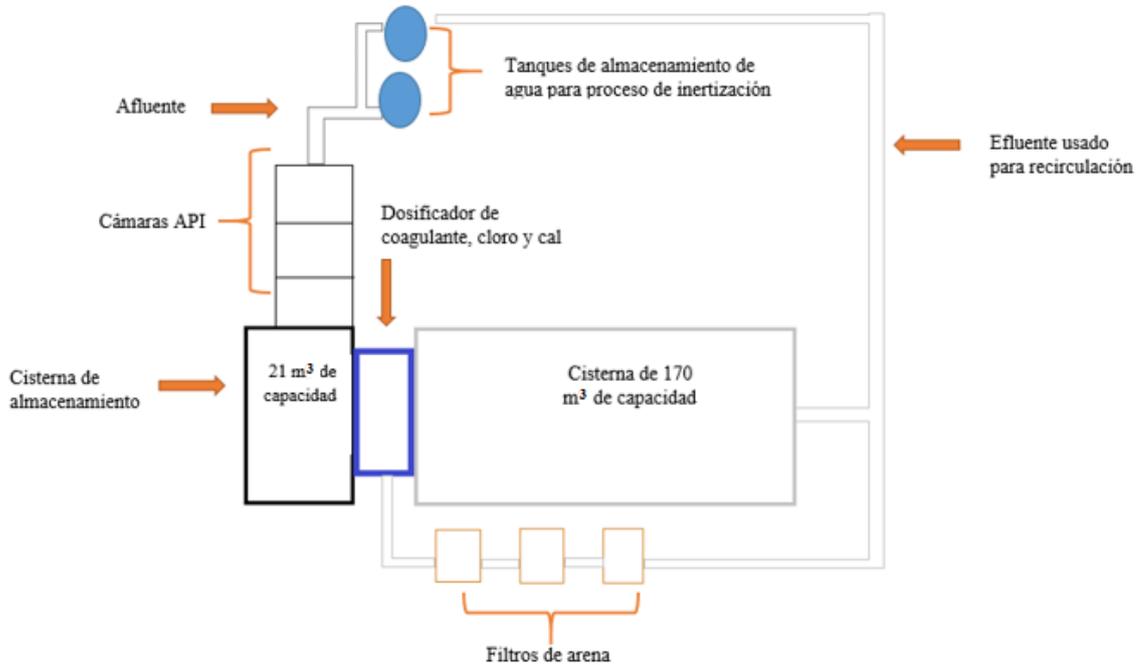
$$\begin{aligned} \text{Caudal diario de agua residual} &= \frac{45 \text{ m}^3 \text{ de agua residual}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ día}}{8.5 \text{ horas}} \\ &= 5.29 \frac{\text{m}^3 \text{ de agua residual}}{\text{hora}} \end{aligned}$$

Cabe mencionar que el taller donde se realiza el proceso de lavado de cilindros dentro de la planta trabaja de lunes a viernes

$$45 \frac{\text{m}^3 \text{ de agua residual}}{\text{día}} \times 5 \frac{\text{días}}{\text{semana}} \times 4 \frac{\text{semanas}}{\text{mes}} = 900 \frac{\text{m}^3 \text{ de agua residual}}{\text{mes}}$$

Figura 1.

Esquema de la PTAR de la Planta Pifo ENI Ecuador S.A.



Nota: La figura indica un esquema de la PTAR presente en la planta Pifo

3.3. Gestor ambiental

Como producto final de este tratamiento se generan una gran cantidad de lodos, los cuales son retirados y almacenados dentro de cilindros metálicos de 55 galones, para que estos sean transportados y tratados por un gestor autorizado por la Autoridad Ambiental Nacional (Ministerio del Ambiente y Agua). Este gestor se encarga de brindar tratamiento a los mismos, el cual puede ser un proceso de combustión controlada donde los lodos pierden su peligrosidad, es decir, su inflamabilidad.

3.4. Análisis CRETIB

El Acuerdo Ministerial 061 Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria Ecuatoriana define a un residuo como peligroso si presenta al menos una de las siguientes características: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o biológico-infecciosa que en ocasiones se les refiere como características CRETIB.

“Los residuos corrosivos son aquellos que presentan un pH menor o igual a 2 o mayor o igual a 12.52; debe ser acuoso y corroer el acero a una tasa mayor que 6.35 mm al año a una temperatura de 55 °C” (INECC, 2007).

Los residuos que son reactivos son muy inestables y suelen reaccionar de forma violenta e inmediata sin explotar; además su reacción violenta resulta al mezclarse con agua, suele generar gases, vapores y humos tóxicos en cantidades suficientes para provocar daños a la salud o al medio ambiente (...) ,son residuos con carácter explosivos, si al mezclarse con el agua fácilmente forman una reacción o descomposición detonante a 25 °C y 1 atm.

La identificación de esta característica está basada en la norma NOM-052-SEMARNAT/93 junto con el conocimiento del origen o composición del residuo (...) ,un residuo se lo considera tóxico si tiene el potencial de causar la muerte, lesiones graves, o tiene efectos perjudiciales para la salud, sea este ingerido, inhalado o si hay contacto directo con la piel (...) ,los residuos inflamables tienen como propiedades el ser líquido y tener un punto de inflamación inferior a 60°C, con excepción de las soluciones acuosas con menos de 24% de alcohol; producen una persistente flama (García, 2018).

“La característica biológico-infecciosa la poseen los residuos que contienen microorganismos y toxinas capaces de propagar enfermedades. Algunos ejemplos son: gasas con sangre, algodones utilizados para inyecciones, jeringas” (García, 2018). La clasificación de los residuos peligrosos biológico-infecciosos está contenida en la NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002.

Para la determinación de las características de corrosividad, reactividad, inflamabilidad y toxicidad se utilizan las normativas EPA 9045 D; Rev. 04; 2004, EPA 9014, EPA 1010 A al igual que la ya mencionada NOM-052-SEMARNAT/93 (ALS Corplab, 2019).

3.4.1. Resultados de análisis CRETIB

Estos lodos poseen las siguientes características según el análisis CRETIB realizado el 19 de abril del 2019 (ALS Corplab, 2019):

3.4.1.1. pH. Es la medida de acidez o de alcalinidad de una sustancia (Gonzales Toro, 2011). El lodo presenta un pH de 5.79.

3.4.1.2. Reacción con agua. Es la característica de un elemento a reaccionar cuando este entra en contacto con agua. El lodo no reacciona con agua.

3.4.1.3. Reacción con ácido. También llamada reacción de neutralización y ocurre entre un ácido y una base, donde un ion hidrógeno del ácido es eliminado y es añadido a la base conjugada (UAH). El lodo no reacciona con ácido.

3.4.1.4. Reacción con álcali. Origina una reacción de neutralización debido a la reacción del álcali con un ácido lo cual produce una sal; llámese sal a todo compuesto iónico cuyo catión provenga de una base y cuyo anión provenga de un ácido (R. Nave, 2008). El lodo no reacciona con álcali.

3.4.1.5. Generación de HCN. Es la característica de un elemento a generar cianuro de hidrógeno. El lodo genera 0.19 mg/kg de HCN.

3.4.1.6. Generación de H₂S. Es la característica de un elemento a generar ácido sulfhídrico. El lodo genera <3 mg/kg de ácido sulfhídrico.

3.4.1.7. Reacción o descomposición detonante o explosiva. “Es aquel compuesto o mezcla de ellos, que pueden reaccionar violentamente, desprendiendo una gran cantidad de gases y de calor” (Yerga, 2010). El lodo no tiene reacción explosiva.

3.4.1.8. Capaz de provocar fuego si no es líquido. Es la característica de un elemento que tiene la capacidad de provocar fuego si se encuentra en estado sólido o gaseoso. El lodo si es capaz de provocar fuego si no es líquido.

3.4.1.9. Arsénico. “El arsénico es un elemento natural de la corteza terrestre; ampliamente distribuido en todo el medio ambiente, está presente en el aire, el agua y la tierra. En su forma inorgánica es muy tóxico” (OMS, 2020). El lodo contiene <0.002 mg/L.

3.4.1.10. Bario. “Ocupa el decimotavo lugar en abundancia en la corteza terrestre, en donde se encuentra en un 0.04%, valor intermedio entre el calcio y el estroncio, los otros metales alcalinotérreos” (Lenntech, 2020). El lodo contiene <0.50 mg/L.

3.4.1.11. Cadmio. “Elemento químico relativamente raro, símbolo Cd, número atómico 48; tiene relación estrecha con el zinc, con el que se encuentra asociado en la naturaleza. Es un metal dúctil, de color blanco argentino con un ligero matiz azulado” (Lenntech, 2020). El lodo contiene <0.02 mg/L.

3.4.1.12. Cromo total. Ampliamente distribuido en la corteza terrestre, el cromo es bien conocido por su uso en la industria metalmeccánica para aumentar la dureza y la resistencia a la corrosión. Se puede encontrar en el agua en varios estados de oxidación, siendo los más comunes 3+ y 6+. El análisis de cromo total engloba al hexavalente (Microlab, 2020).

El lodo contiene 0.12 mg/L.

3.4.1.13. Mercurio. Elemento químico, símbolo Hg, número atómico 80 y masa atómica 200.59 uma. Es un líquido blanco plateado a temperatura ambiente (punto de fusión -38.4°C o -37.12 °F); ebulle a 357°C (675.05 °F) a presión atmosférica. Es un metal noble, soluble únicamente en soluciones oxidantes. El mercurio sólido es tan suave como el plomo. El metal y sus compuestos son muy tóxicos (Lenntech, 2020).

El lodo contiene <0.002 mg/L.

3.4.1.14. Plata. “Elemento químico, símbolo Ag, número atómico 47 y masa atómica 107.870 uma. Es un metal lustroso de color blanco-grisáceo. Desde el punto de vista químico, es uno de los metales pesados y nobles” (Lenntech, 2020). El lodo contiene <0.05 mg/L.

3.4.1.15. Plomo. Elemento químico, Pb, número atómico 82 y masa atómica 207.19 uma. El plomo es un metal pesado (densidad relativa, o gravedad específica, de 11.4 a 16° C), de color azulado, que se empaña para adquirir un color gris mate. Es flexible, inelástico, se funde con facilidad a 327.4°C (621.3°F) y hierve a 1725°C (3164°F) (Lenntech, 2020).

El lodo contiene 0.21 mg/L.

3.4.1.16. Selenio. “Elemento químico, símbolo Se, número atómico 34 y masa atómica 78.96 uma. Sus propiedades son semejantes a las del telurio” (Lenntech, 2020). El lodo contiene <0.025 mg/L.

3.4.1.17. Ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D). Herbicida del grupo químico fenoxicético, selectivo post-emergente, de acción traslocación. Desregula el metabolismo de las plantas (EcuRed, 2020). El lodo contiene <0.0020 mg/L.

3.4.1.18. Ácido 2,4,5-triclorofenoxipropiónico (silvex). Es un ácido monocarboxílico (Biblioteca Nacional de Medicina de EE.UU, 2020). El lodo contiene <0.0020 mg/L.

3.4.1.19. Clordano. “Es una mezcla de sustancias químicas utilizada como pesticida. Su estado físico es un líquido espeso que, según su pureza puede ser entre incoloro y ámbar” (PRTR España, 2020). El lodo contiene <0.0010 mg/L.

3.4.1.20. O-Cresol. Isómero del cresol. El lodo contiene 3.93 mg/L.

3.4.1.21. M-Cresol. Isómero del cresol. El lodo contiene 3.93 mg/L.

3.4.1.22. P-Cresol. Isómero del cresol. El lodo contiene 3.93 mg/L.

3.4.1.23. Cresol. Son compuestos orgánicos aromáticos que se clasifican como fenoles. Dependiendo de la temperatura, pueden ser sólidos o líquidos porque tienen puntos de fusión no muy lejos de la temperatura ambiente (EcuRed, 2020). El lodo contiene 11.8 mg/L.

3.4.1.24. 2,4-Dinitrotolueno. A temperatura ambiente es un sólido cristalino de color amarillo anaranjado pálido con un ligero aroma. La mayoría del DNT se utiliza en la producción de diisocianato de tolueno, así como en la producción de espumas de poliuretano flexibles, otros usos incluyen las industrias de explosivos, tintes y plásticos. Para ser utilizado como explosivo es transformado a TNT (Cosmos, 2020). El lodo contiene 0.0320 mg/L.

3.4.1.25. Endrin. “La endrina es una sustancia sólida, blanca, casi sin olor usada como pesticida para controlar insectos, roedores y pájaros” (PRTR España, 2020). El lodo contiene <0.0010 mg/L.

3.4.1.26. Heptacloro. El heptacloro es una sustancia química manufacturada que no existe naturalmente en el medio ambiente. Ha sido usado como plaguicida principalmente en agricultura (PRTR España, 2020). El lodo contiene <0.0010 mg/L.

3.4.1.27. Heptacloro epóxido. “Se produce cuando las bacterias y los animales degradan al heptacloro a epóxido de heptacloro. Es más probable encontrar al epóxido en el medio ambiente que al heptacloro” (ATSDR, 2020). El lodo contiene <0.0010 mg/L.

3.4.1.28. Hexacloroetano. “El hexacloroetano es un sólido incoloro que se evapora gradualmente cuando se expone al aire. Es usado en la manufactura de aluminio” (ATSDR, 2020). El lodo contiene <0.0040 mg/L.

3.4.1.29. Lindano. “El lindano es un insecticida organoclorado usado principalmente en la agricultura. Es una sustancia relativamente volátil y persistente que puede migrar a largas distancias a través del aire, en forma de vapores o adherida a las partículas del suelo” (PRTR España, 2020). El lodo contiene <0.0010 mg/L.

3.4.1.30. Metoxicloro. Es una sustancia química manufacturada usada actualmente en Estados Unidos para controlar insectos (ATSDR, 2020). El lodo contiene <0.0010 mg/L.

3.4.1.31. Nitrobenceno. “Líquido oleoso, incoloro o amarillento y tóxico, que se obtiene tratando benceno con una mezcla de ácidos nítrico y sulfúrico concentrados. Resulta poco soluble en agua y muy soluble en alcohol y éter” (EcuRed, 2020). El lodo contiene <0.0040 mg/L.

3.4.1.32. Pentaclorofenol. “El pentaclorofenol es una sustancia química manufacturada usada como pesticida de uso restringido. También se usa industrialmente para preservar la madera en postes de empresas de servicio público” (ATSDR, 2020). El lodo contiene <0.0050 mg/L.

3.4.1.33. Toxafeno. “El toxafeno es una mezcla de cientos de compuestos clorados diferentes. Fue uno de los pesticidas más usados en los Estados Unidos hasta el año 1982, fecha en la que fue prohibida su aplicación casi en su totalidad” (ATSDR, 2020). El lodo contiene <0.25 mg/L.

3.4.1.34. 2,4,5-Triclorofenol. Compuesto organoclorado, derivado halogenado de hidrocarburos aromáticos, fenoles, homólogos y sus derivados halogenados, usado como pesticida (RISCTOX, 2020). El lodo contiene <0.0050 mg/L.

3.4.1.35. 2,4,6-Triclorofenol. Es un sólido cristalino incoloro sintético que es ligeramente soluble en agua y soluble en solventes orgánicos. Se ha utilizado principalmente en formulaciones de pesticidas y como conservante de la madera, aunque la mayoría de los usos se han cancelado en los EE. UU (Biblioteca Nacional de Medicina de EE.UU, 2020). El lodo contiene <0.0054 mg/L.

3.4.1.36. Benceno. “Líquido incoloro con olor dulce. Se evapora al aire rápidamente y es poco soluble en agua. Es altamente inflamable y se forma tanto de procesos naturales como de actividades humanas” (EcuRed, 2020). El lodo contiene 0.477 mg/L.

3.4.1.37. Clorobenceno. “El clorobenceno es un líquido incoloro, inflamable, de olor aromático parecido a almendras. Cierta porción se disolverá en agua, pero se evapora rápidamente al aire. No se genera en forma natural en el ambiente” (ATSDR, 2020). El lodo contiene <0.025 mg/L.

3.4.1.38. Cloroformo. El cloroformo es un compuesto químico también conocido como triclorometano o tricloruro de metilo. Es un líquido incoloro con un olor agradable y no irritante, así como un sabor dulzón. La mayor parte del cloroformo que se encuentra en el medio ambiente proviene de la industria. Esta sustancia sólo arde cuando alcanza temperaturas muy altas. El cloroformo fue uno de los primeros anestésicos inhalados que se utilizaron durante las cirugías, pero actualmente ya no tiene esta aplicación (ATSDR, 2020).

El lodo contiene <0.10 mg/L.

3.4.1.39. Cloruro de vinilo. “El cloruro de vinilo es conocido también como cloroetano, cloroetileno, monocloruro de etileno o monocloroetileno. A temperatura ambiente, es un gas incoloro, se incendia fácilmente y es inestable a altas temperaturas” (ATSDR, 2020). El lodo contiene <0.050 mg/L.

3.4.1.40. 1,4-Diclorobenceno. Cada uno de los tres tipos de DCBs (1,2-DCB, 1,3-DCB y 1,4-DCB) contiene dos átomos de cloro conectados a una molécula de benceno. El 1,2-DCB es un líquido incoloro a amarillo pálido usado para fabricar herbicidas. El 1,3-DCB es un líquido incoloro usado para fabricar herbicidas, insecticidas, medicamentos y tinturas. El 1,4-DCB, el más importante de los tres compuestos, es un sólido incoloro a blanco. Se usa también para fabricar bloques desodorantes usados en los botes de basura y en baños, y para ayudar a controlar el olor en sitios donde se mantienen animales. También se ha usado como insecticida en frutas y como agente para controlar el moho en semillas de tabaco, cuero y algunas telas (ATSDR, 2020).

El lodo contiene <0.025 mg/L.

3.4.1.41. 1,2-Dicloroetano. El 1,2-dicloroetano, llamado también dicloruro de etileno es una sustancia química manufacturada que no ocurre en forma natural en el medio ambiente. Es un líquido transparente y tiene un olor dulce agradable. El uso más común del 1,2-dicloroetano es en la producción de cloruro de vinilo, sustancia que se usa para manufacturar una variedad de productos plásticos y de vinilo, incluyendo cañerías de cloruro de polivinilo (PVC), tapices de muebles y automóviles (ATSDR, 2020).

El lodo contiene <0.025 mg/L.

3.4.1.42. 1,1-Dicloroetileno. “Se usa para fabricar ciertos tipos de plásticos flexibles como aquellos para envolver alimentos, y en materiales de empaque. También se usa para darle resistencia al fuego a fibras y al reverso de alfombras” (ATSDR, 2020). El lodo contiene <0.025 mg/L.

3.4.1.43. Hexaclorobenceno. “Es una sustancia sólida, de color blanco cristalino, con un olor desagradable y bastante volátil. Es prácticamente insoluble en el agua, pero se disuelve fácilmente en otras sustancias como los disolventes orgánicos, las grasas y los aceites” (ATSDR, 2020). El lodo contiene <0.0040 mg/L.

3.4.1.44. Hexaclorobutadieno. También conocido como HCBD, perclorobutadieno o Dolen-Pur, es un líquido incoloro que no se evapora o quema fácilmente. El hexaclorobutadieno tiene un olor parecido a la trementina. Es un producto intermedio en la fabricación de compuestos de goma y lubricantes; se utiliza como fluido para giroscopios, líquido para la transferencia de calor o fluido hidráulico (ATSDR, 2020).

El lodo contiene <0.0040 mg/L.

3.4.1.45. Metil etil cetona. Es un líquido incoloro con un olor dulce/agudo, fragante, parecido al de la acetona. Es un líquido y vapor extremadamente inflamable. El uso principal es como solvente, particularmente para diversos sistemas de recubrimiento, como el vinilo, adhesivos, nitrocelulosa y revestimientos acrílicos; para removedores de pintura, laqueadores, barnices, pinturas en spray, selladores (CCSSO, 2020).

El lodo contiene <1.0 mg/L.

3.4.1.46. Piridina. “Es un líquido incoloro de olor característico desagradable. Pertenece a la familia de los compuestos aromáticos heterocíclicos, y está estructuralmente relacionada al benceno” (EcuRed, 2020). El lodo contiene <2.0 mg/L.

3.4.1.47. Tetracloroetileno. El tetracloroetileno es un líquido incoloro no inflamable. También se le conoce como percloroetileno, PCE, perc, tetracloroeteno y perclor, se usa como agente para limpiar en seco y como solvente para desengrasar metales. También se usa en la manufactura de otros productos químicos y en algunos artículos de consumo (ATSDR, 2020).

El lodo contiene <0.025 mg/L.

3.4.1.48. Tetracloruro de carbono. Es un líquido incoloro de olor dulce que puede ser detectado a bajos niveles. Se conoce también como cloruro de carbono, tetracloruro de metano, perclorometano, tetracloroetano o benciformo. En el pasado se usó en la producción de líquido refrigerante y propulsor de aerosoles, como plaguicida, como agente para limpiar y desgrasar, en extinguidores de fuego y para remover manchas (ATSDR, 2020).

El lodo contiene <0.025 mg/L.

3.4.1.49. Tricloroetileno. El tricloroetileno es un líquido volátil incoloro a temperatura ambiente y 1 atm de presión. El tricloroetileno líquido se evapora rápidamente al aire. No es inflamable y tiene un olor dulce. Los dos usos principales del tricloroetileno son como solvente para remover grasa de piezas de metal y como precursor de otras sustancias químicas, especialmente el refrigerante HFC-134 (ATSDR, 2020).

El lodo contiene <0.025 mg/L.

3.5. Normativa legal aplicable

Existe ausencia de normativa legal en Ecuador sobre el manejo de lodos residuales, límites máximos permisibles, posibles usos, entre otros. La presente investigación se centra en la deshidratación de un lodo que posee características inflamables según el análisis CRETIB realizado a este, sus resultados se encuentran en el *Anexo 4*. Según el Acuerdo Ministerial 061 Reforma del Libro VI de la Legislación Secundaria en su artículo 79 inciso a):

Se considerará como desechos peligrosos los siguientes... los desechos sólidos, pastosos, líquidos o gaseosos resultantes de un proceso de producción, extracción, transformación, reciclaje, utilización o consumo y que contengan alguna sustancia que tenga características corrosivas, reactivas, tóxicas, inflamables, biológicoinfecciosas y/o radioactivas, que representen un riesgo para la salud humana y el ambiente de acuerdo con las disposiciones legales aplicables.

Por lo tanto, debido a que cumple con una de las características CRETIB se lo cataloga como “residuo peligroso” y no es posible su reutilización para fines agrícolas o de otro tipo.

En el Código Orgánico del Ambiente se encuentra el siguiente artículo que se refiere a la gestión de desechos peligrosos:

Art. 239 1): Considerando la disponibilidad de tecnologías existentes para el transporte, eliminación o disposición final de residuos y desechos peligrosos y especiales, la Autoridad Ambiental Nacional dispondrá, de conformidad con la norma técnica, la presentación de requerimientos adicionales como parte de la regularización.

En cuanto a las sanciones por infracciones graves con aspectos relacionados a la gestión de residuos peligrosos, se menciona lo siguiente:

Art. 317 18): El incumplimiento de la obligación de presentar los programas de gestión integral de productos que se convierten en desechos peligrosos. Para esta infracción se aplicará, según corresponda, la sanción contenida en el numeral 4 del artículo 320.

Sin embargo dentro del Reglamento Sustitutivo del Reglamento Ambiental para las Operaciones Hidrocarburíferas en el Ecuador Anexo 2, se menciona 2 clasificaciones para los desechos procedentes de todas las fases y operaciones hidrocarburíferas, y recomendaciones de reducción, tratamiento y disposición, siendo los primeros aquellos desechos caracterizados como peligrosos (conforme a la clasificación de desechos peligrosos del Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación; vigente desde 1992) y en la segunda clasificación, se encuentran aquellos desechos no caracterizados como peligrosos (sujetos a control conforme a este Reglamento) como se observa en la **Tabla 1**.

Tabla 1.*Clasificación de desechos procedentes de todas las fases y operaciones*

Código	Tipo de desecho	Reducción, tratamiento y disposición
B0045	Desechos domésticos inorgánicos	Clasificación; disposición controlada
B0046	Desechos domésticos orgánicos	Clasificación; compostaje
B2011	Ripios	Disposición controlada
B2020	Desechos de vidrio	Clasificación; reciclaje
B2041	Agua de formación	Reinyección
B2042	Sedimentos de perforación y fondos contaminados del almacenamiento o depósito de desperdicios no peligrosos	Disposición controlada de sólidos
B3001	Tierra con hidrocarburos	Prevención de derrames; biorremediación, landfarming
B3002	Lodos y arena contaminados con hidrocarburos	Biorremediación, landfarming
B3003	Hidrocarburos recuperados en el flujo de producción y/o tratamiento de efluentes	Reincorporación al proceso de producción
B3004	Desechos de petróleo crudo	Reincorporación al proceso de producción
B3005	Gases retirados del flujo de producción tales como: sulfito de hidrógeno y dióxido de carbono y otros hidrocarburos volatilizados	Recuperación y tratamiento dentro de los procesos de producción
B3006	Fluidos y lodos de perforación	Priorización de lodos de perforación en base de agua; reciclaje de lodos; tratamiento de sedimentación y decantación; reinyección de líquidos; disposición controlada de sólidos
B3010	Desechos de plástico	Clasificación; reciclaje
B3020	Desechos de papel, cartón y productos de papel	Clasificación; reciclaje
B3030	Desechos textiles	Clasificación; reciclaje
B3150	Otros desechos inorgánicos industriales no clasificados como peligrosos (especificar)	Clasificación; disposición controlada

Nota: La presente tabla indica los posibles tratamientos para desechos considerados peligrosos. Tomado de: Reglamento Sustitutivo del RAOHE.

Se puede observar que el desecho con código B3002 corresponde a lodos y arenas contaminadas con hidrocarburos, este no es considerado como un residuo peligroso y menciona que puede ser tratado con métodos de biorremediación y landfarming.

3.6. Componentes del GLP

3.6.1. Propano

Es un hidrocarburo (C_3H_8) inodoro y no tóxico a presiones y temperaturas normales. Cuando se presuriza es un líquido, con una densidad de energía 270 veces mayor que en su forma gaseosa. El propano es un subproducto del procesamiento de gas natural y del refinamiento del petróleo (U.S. Department of Energy, 2010).

3.6.2. Propeno

También llamado propileno, es un alqueno formado por 3 átomos de carbono y 6 átomos de hidrógeno, su fórmula global es C_3H_6 . Es un homólogo del etileno, presenta el doble enlace como grupo funcional. Es el segundo compuesto más utilizado en la industria química en todo el mundo (EcuRed, 2020).

3.6.3. Butano

“Es un hidrocarburo saturado, parafínico o alifático, inflamable, gaseoso que se licúa a presión atmosférica a $-0,5\text{ }^\circ\text{C}$, formado por cuatro átomos de carbono y por diez de hidrógeno, cuya fórmula química es C_4H_{10} ” (Cabrerizo, Antón Bozal, & Barrio Pérez, 2008).

3.6.4. Buteno

“Hidrocarburo gaseoso incoloro que se usa en síntesis química. Alqueno formado por 4 átomos de carbono y 8 átomos de hidrógeno. Nombre de los isómeros de olefina con la fórmula C_4H_8 (1-buteno y 2-buteno)” (EcuRed, 2020).

3.7. Clasificación de lodos

Se plantea la clasificación de lodos residuales en función de los procesos que se aplican dentro de la PTAR.

3.7.1. Lodos primarios

Son producidos en la sedimentación primaria, en la cual se remueven sólidos sedimentables. La cantidad depende de la carga superficial o tiempo hidráulico de retención. En la sedimentación primaria con químicos se produce más lodo, producto de una mayor remoción y de la precipitación química de la materia coloidal (Limón Macías, 2013).

3.7.2. Lodos secundarios

“Son subproducto del tratamiento secundario biológico. Estos lodos se generan en los reactores biológicos y en el sedimentador secundario son separados del agua. Consisten en lodos biológicos constituidos principalmente por materia orgánica” (Metcalf y Eddy, 1995).

3.7.3. Lodos mixtos

Son la mezcla que se produce a partir de los fangos primarios y secundarios o activos presentando características similares a ambos tipos de lodo que lo conforman (Gualoto, 2016).

3.7.4. Lodos químicos

“Son aquellos lodos que se generan al agregar compuestos químicos, como sales de aluminio o hierro, con el fin de mejorar los procesos de sedimentación para remover sólidos suspendidos o precipitar sustancias” (Moeller, Ramírez et al., 2005). El lodo de la PTAR analizado en el presente estudio entra en esta categoría debido al uso de coagulantes para su tratamiento.

3.8. Tipos de tratamientos

Los lodos procedentes de procesos industriales de diferente naturaleza requieren de mecanismos para reducir y controlar el contenido de humedad, mal olor y materia orgánica para su posterior tratamiento y disposición final. A continuación, se mencionan los tratamientos que cumplen con la característica de reducción de humedad.

3.8.1. Espesamiento

Gualoto (2016) explica que este tratamiento se lo utiliza con el fin de eliminar el agua que se encuentra en los espacios libres entre las partículas de los sedimentos para reducir el volumen entre un 5 % a 10 % del volumen inicial (p.11).

3.8.1.1. Espesamiento por gravedad. Según Escalante *et al.* (2005) son mecanismos rotatorios que se encargan de hacer que las partículas de lodo aumenten la capacidad de sedimentación y compactación para conseguir un lodo más espeso, sin embargo es un método que requiere de gran área, no es eficiente en la separación sólido-líquido y puede producir olor.

3.8.1.2. Espesamiento por centrifugación. Se utiliza para deshidratar o espesar lodos, aunque requiere de un alto costo de operación y mantenimiento, este método trabaja con grandes cantidades de lodo en espacios reducidos, se aplica introduciendo el lodo en un tanque y por acción de la fuerza centrífuga la materia en estado sólido es arrastrada hacia las paredes del tanque.

3.8.1.3. Espesamiento por filtro de banda. A través de una banda transportadora el lodo se desplaza sobre rodillos en todo el ancho de la banda, se produce un escurrimiento del agua gracias a unas cuchillas que forman surcos, así permite que el agua sea liberada a través de la banda.

3.8.2. Procesos fisicoquímicos

Según Metcalf & Eddy (1995), estos procesos se emplean para el tratamiento de vertidos industriales, dónde las dosificaciones de reactivos se determinan a partir de ensayos en laboratorio o en estudios de planta piloto.

3.8.2.1. Floculación. Se aplica con el fin de aumentar la eliminación de los sólidos en suspensión, acondicionar el agua residual y mejorar la eficiencia en procesos de decantación a partir de la formación de flóculos (Metcalf & Eddy, 1995).

Burgos (2015) explica que:

En el proceso de floculación la atracción que presenta una gota de agua hacia otras gotas se debe a la presencia de un demulsificante, lo que hace que se produzcan grandes aglomeraciones, así mismo para que exista buena atracción en una emulsión aceite/agua, el demulsificante debe migrar de forma rápida hacia la zona de interfase, que es el lugar en donde ocurre la deshidratación y la zona en donde se encuentra el emulsionante con el fin de ganar espacio, competir y romper la película de emulsión presente.

3.8.2.2. Estabilización con cal. Según Metcalf & Eddy (1995) el proceso consiste en la adición de cal al lodo, como consecuencia se eleva el pH por encima de 12 con el fin de evitar olores, conservar el lodo y evitar la supervivencia de microorganismos.

Gualoto (2016) afirma que:

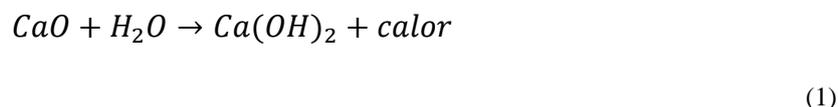
La incorporación de hidróxido de calcio o también llamada cal hidratada se agrega antes o después del proceso de deshidratación del lodo. El pretratamiento con cal requiere de mayor cantidad de este por peso unitario de lodo tratado, que la que se requiere para el proceso de deshidratación, mientras que el proceso de post-tratamiento con cal previo a la deshidratación elimina problemas de mantenimiento en los equipos utilizados para la deshidratación de lodos, así como también no requiere de la adición de agua al fango deshidratado para agregar cal.

3.8.2.3. Acondicionamiento químico. El objetivo de aplicación del acondicionamiento químico es la obtención de lodo a determinadas condiciones para incrementar la eficiencia en los procesos de espesamiento y deshidratación del lodo. Consiste en la liberación de moléculas acuosas del líquido a través de la alteración en la estructura entre el sólido y el agua (Fall, 2005), el acondicionamiento comúnmente consiste en la adición de reactivos químicos como coagulantes (inorgánicos o polímeros), que son los más utilizados junto a los tratamientos térmicos.

Metcalf y Eddy (1995) mencionan que:

el acondicionamiento químico permite reducir la humedad del fango desde el 90-99 % hasta el 65-85 % según el sólido a tratar, así mismo este proceso se lleva a cabo antes de la aplicación de sistemas de deshidratación mecánica como filtros al vacío, centrifugación, filtros banda y filtros prensa. Para este tratamiento se emplean químicos como el cloruro férrico, la cal, la alúmina y polímeros orgánicos.

En el caso del uso de cal viva como acondicionante previo al proceso de deshidratación, existen 2 ventajas que se pueden explicar a partir de la reacción producida cuando entra en contacto con el agua.



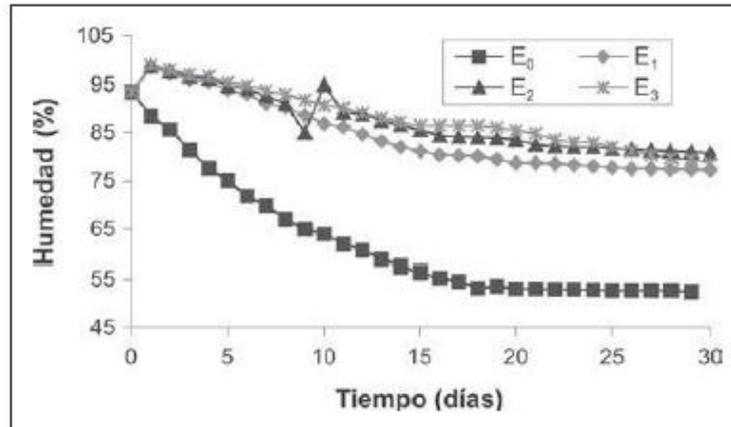
1. Es una reacción exotérmica, que puede elevar la temperatura por arriba de 50 °C (Vilca, 2019).
2. Parte del agua contenida se une al calcio, lo que favorece el proceso de secado (UDLAP).

La utilización de óxido de calcio como tratamiento posterior a un proceso de deshidratación se recomienda más que su utilización previa a dicho procedimiento. Torres *et al.* (2005) realizó una evaluación de la aplicación de este reactivo en lechos de secado previo al proceso de deshidratación. Se utilizó varias dosis de cal viva en función del peso de lodo, se formaron 4 grupos donde se utilizó 0% (E₀), 20% (E₁), 40% (E₂) y 65% (E₃) de cal viva respecto al peso del lodo.

La **Figura 2** muestra a continuación el comportamiento de la humedad a lo largo de 30 días de secado.

Figura 2.

Comportamiento de humedad de lodos con diferentes concentraciones de cal



Nota: La presente figura indica el comportamiento de humedad de un lodo usando diferentes concentraciones de cal. Tomado de (Torres, Marmolejo et al., 2005).

Se puede observar que entre las 3 concentraciones usadas existe un comportamiento muy similar para la reducción del contenido de humedad, llegando a obtenerse valores entre el 77%-80%, y que se obtuvo una reducción mayor del contenido de humedad en el grupo donde se usó 0% de cal viva. Torres *et al.* (2005), también menciona que la consistencia de los lodos, previendo el uso agrícola, debe ser pastosa, es decir con una humedad mayor al 65% - 70% para garantizar una adecuada reacción de la cal con el agua contenida en el lodo, promoviendo una buena reacción exotérmica.

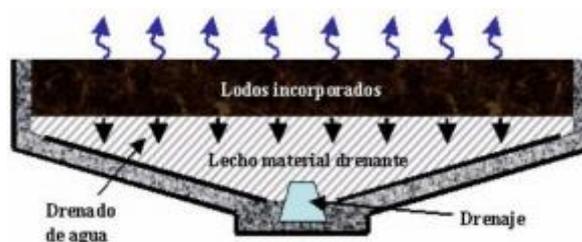
3.8.3. Deshidratación

3.8.3.1. Secado solar. Es un tipo de tratamiento que se realiza de forma natural, ocurre principalmente por evaporación, depende de las condiciones climáticas, requiere de mano de obra para la remoción del lodo, el secado solar implica bajo consumo de energía y de productos químicos, resulta ventajosa su aplicación en plantas pequeñas que se encuentren aisladas, puesto que requieren de grandes extensiones de superficie (Córdova, 2012).

La principal ventaja que presenta la implementación de este tratamiento se encuentra reflejado en el bajo costo siempre y cuando se disponga del área suficiente (Córdova, 2012).

Figura 3.

Sistema de secado natural

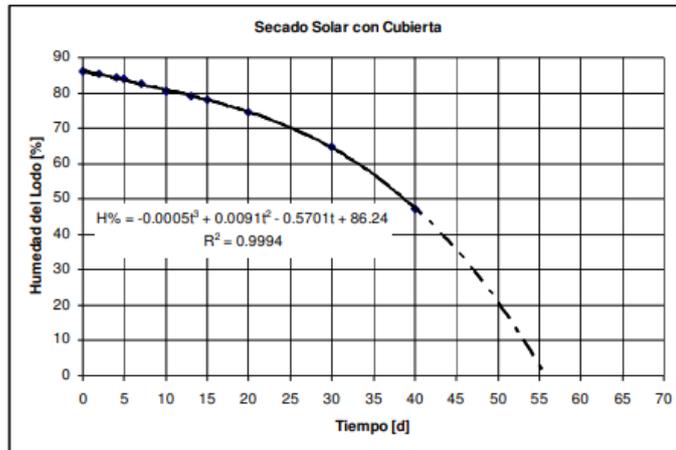


Nota: En la presente figura se puede observar una vista transversal de un sistema de secado natural. Tomado de (Córdova, 2012).

Valencia (2018) realizó una investigación dentro del ámbito del secado solar para la deshidratación de lodos, evaluó en este caso un secado solar con cubierta y otro dentro de un invernadero, obteniéndose los siguientes gráficos de velocidad de secado para cada caso respectivamente:

Figura 4.

Curva de secado solar con cubierta

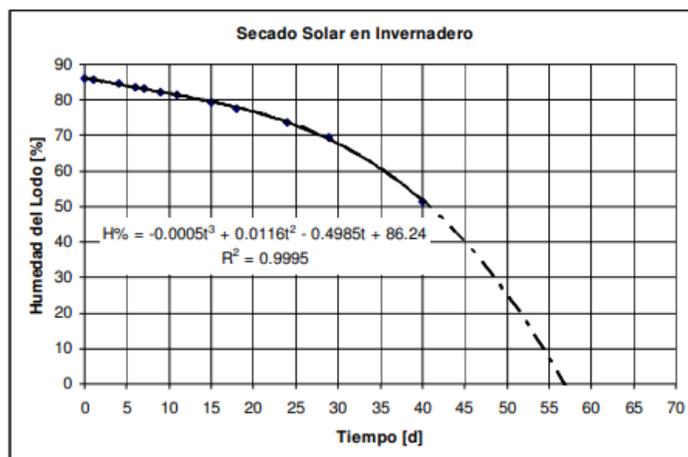


Nota: La presente figura indica el comportamiento de humedad de un lodo puesto bajo cubierta. Tomado de (Valencia, 2008).

La velocidad promedio alcanzada dentro de esta modalidad fue de 1.08 Kg H₂O/m²d, el lodo residual perdió un 38.94% de su humedad inicial durante 40 días de experimentación.

Figura 5.

Curva de secado solar en invernadero



Nota: La presente figura indica el comportamiento de humedad de un lodo colocado dentro de invernadero. Tomado de (Valencia, 2008).

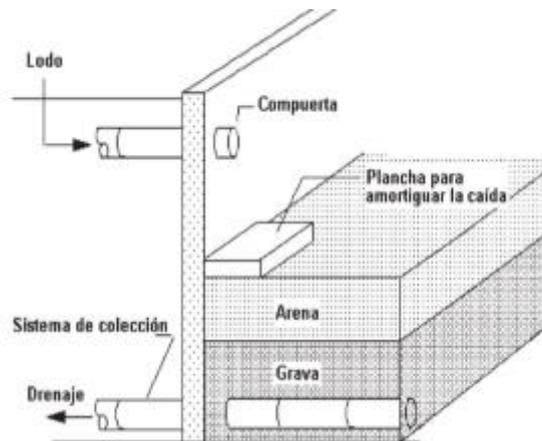
La velocidad promedio alcanzada dentro de esta modalidad fue de 0.93 Kg H₂O/m²d, el lodo residual perdió un 34.74% de su humedad inicial durante los 40 días de experimentación.

Basándose en la información obtenida se puede afirmar que el secado solar dentro de un invernadero redujo menos porcentaje de humedad en el lodo residual tratado, lo cual implica que esta modalidad tomaría más tiempo para reducir el contenido de humedad de los lodos a comparación del secado solar con cubierta.

3.8.3.2. Lechos de secado. Este método remueve el agua a través de una capa de grava, y otra de arena con el fin de deshidratar el lodo por evaporación y drenaje gravitacional del líquido a través de arena, grava y tuberías. En la **Figura 6** se detalla el ejemplo del corte de un lecho de secado, que menciona Gualoto en su trabajo.

Figura 6.

Corte de un lecho de secado

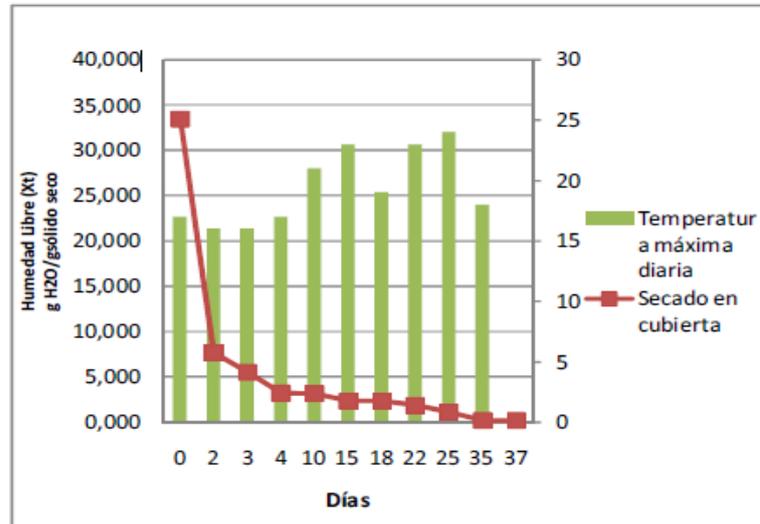


Nota: En la presente figura se puede observar el esquema de un lecho de secado. Tomado de (Córdova, 2012).

Dentro de la investigación realizada por Córdova (2012), en la cual se analizó el proceso de deshidratación de lodos obtenidos de una IN (Planta de Tratamiento de Agua Potable por sus siglas) menciona que se evaluaron 4 lechos de secado, de los cuales la mitad de ellos se encontraban bajo cubierta simple y la otra mitad dentro de un invernadero. El comportamiento de los lechos que se encontraban bajo cubierta fue el siguiente:

Figura 7.

Comportamiento de la deshidratación de lodos bajo cubierta en PTAP Checa

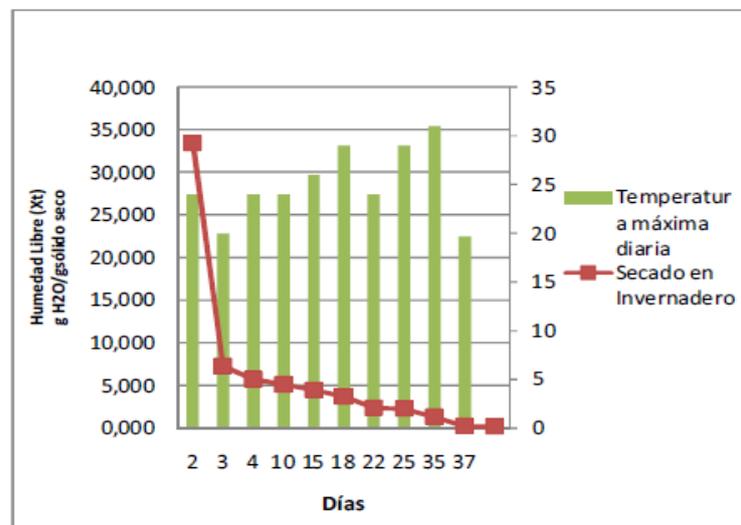


Nota: En la presente figura se indica el comportamiento de humedad de lodos de una PTAP bajo cubierta. Tomado de (Córdova, 2012).

La deshidratación del lodo bajo esta modalidad tuvo una disminución considerable de humedad en los dos primeros días y esto se debe a que el agua pasa por el lecho filtrante para su posterior secado.

Figura 8.

Comportamiento de la deshidratación de lodos dentro de invernadero en PTAP Checa



Nota: En la presente figura se puede observar el comportamiento de la humedad de lodos de una PTAP dentro de invernadero. Tomado de (Córdova Martínez, 2012).

Se evidencia que en ambos casos ocurrió una gran disminución de la humedad en los primeros días, sin embargo, es importante mencionar que a causa del aumento de la temperatura en los lechos de secado dentro de un invernadero se efectuó un aumento de la pendiente de la velocidad de secado desde el día 22 al día 30.

3.8.3.3. Filtración al vacío. En este proceso la pérdida de carga a través del medio filtrante y de la torta formada sobre este, se vence mediante el vacío generado. Su uso ha disminuido debido a que se ha venido desarrollando y mejorando otro tipo de equipos mecánicos que poseen la misma función, sin mencionar que existe complejidad para su aplicación, elevado costo de mantenimiento y se requiere uso de aditivos químicos para su acondicionamiento.

Según Moretón (2008) existen dos tipos de filtros al vacío que son:

Filtro de tambor al vacío, el cual consiste en una cuba donde se sumerge un cilindro o tambor que gira a revoluciones determinadas y en cuyo interior se genera el vacío. En este tipo de filtro se deben conjugar valores de sumergencia, velocidad, diámetro del tambor y longitud del mismo para lograr una distribución adecuada de la superficie filtrante.

Filtro de banda al vacío, en este caso la suspensión se vierte sobre una banda de movimiento horizontal, bajo la cual se realiza el vacío necesario para la filtración. Este tipo de filtro permite mayores tiempos de deshidratación de la torta (p. 13-15).

3.8.3.4. Filtro prensa. El filtro prensa tiene una serie de elementos filtrantes que funcionan en paralelo. Cada filtro se caracteriza por tener una superficie filtrante y un volumen de retención de las partes sólidas las cuales pueden ser grandes o pequeñas en función de la dimensión del filtro y de su número de placas. El medio filtrante en este caso puede ser material sintético o cartón filtrante (Galigani Filtri, 2020).

3.8.3.5. Combustión controlada. Este proceso sirve para el análisis simultáneo de eficiencia termodinámica de combustión y emisiones contaminantes en sólidos con potencial combustible y consiste de una cámara de combustión; una unidad de transferencia de calor, que comprende una conexión para un dispositivo que analiza los gases de combustión con el objetivo de determinar los rendimientos de combustión y quemado; y una unidad de almacenamiento de las emisiones de la combustión. Sin embargo, este método no ha sido probado en lodos efluentes de una PTAR de una planta envasadora de gas doméstico, por ello no existe referencia de la eficiencia del mismo en el proceso de deshidratación, y por tanto, remoción de contenido de humedad.

3.8.4. Combinación de varios métodos

Como parte de la metodología para un buen tratamiento de deshidratación de lodos Marfisi y Salager (2004) detallan la combinación de métodos químicos y eléctricos, cómo se describen a continuación:

El proceso inicia con la aplicación de tratamiento químico, un demulsificante se inyecta y es capaz de romper una mezcla emulsionante (agua/aceite) definida por Hernández (2018) como la combinación de dos líquidos inmiscibles, dónde uno de los líquidos se encuentra disperso. El demulsificante contiene mezclas de sustancias químicas anfífilas, hidrofílicas las mismas que actúan sobre la interfase (agua/aceite) con el fin de separar las distintas fases (Marfisi et al., 2009). Con el uso de un demulsificante se pretende disminuir la tensión superficial que existe entre las fases a tratar.

La inyección del demulsificante puede realizarse en la superficie del pozo o en el fondo del mismo, Burgos (2015) considera la aplicación de demulsificante en el fondo de la mezcla, a través de una tubería capilar o sistema de recirculación, con el fin de obtener un rápido contacto entre las fases antes que se produzca la emulsión, sucede bajo condiciones de temperatura alta en el fondo, como resultado la presión en la superficie se reduce, sin embargo, la aplicación del demulsificante en el fondo del pozo implica alto costo inicial, de mantenimiento y servicios puesto que se requiere de la instalación de inyectores.

La ley de Stokes permite deducir la estabilidad de las emulsiones, esta ley menciona que cuando una esfera pequeña está bajo la influencia de la gravedad en un líquido viscoso obtiene una velocidad constante de caída (Burgos, 2015).

$$V = \frac{g(\rho_w - \rho_o)r^2}{18\mu} \quad (2)$$

Dónde los siguientes factores influyen en la velocidad de caída de las gotas de agua:

V: velocidad terminal de la gota de agua

r: radio de la fase dispersa (gotas de agua)

ρ_w : densidad de la fase dispersa (agua)

ρ_o : densidad de la fase continua (aceite)

μ : viscosidad de la fase continua (aceite)

g: aceleración de la gravedad

La viscosidad de la fase continua es inversamente proporcional a la velocidad de caída y a la temperatura. Además, el radio de la fase dispersa puede incrementar debido a la coalescencia, de modo que la velocidad de caída también aumenta, el efecto de los demulsificantes incrementa el tamaño de las gotas afectando a las velocidades de resolución Burgos (2015).

Los métodos de deshidratación se pueden combinar según el tipo de aceite y la disponibilidad de recursos, de forma general se usa la combinación de tratamientos térmicos y químicos con uno mecánico o eléctrico, Marfisi y Salager (2004) describen la acción del campo eléctrico, dónde la fuerza resultante entre dos gotas que están cargadas está dada por la Ley de Coulomb, como resultado de la aplicación de dicha fuerza se genera la coalescencia, esto ocurre cuando una gota migra hacia el electrodo de carga opuesta permitiendo el contacto con otras gotas, esto provoca una fusión en gotas más grandes de manera que las gotas precipitan debido a la fuerza de gravedad.

Además, existen otros mecanismos de carga para una gota, los cuáles pueden ser por; ionización, adsorción o transferencia de carga convectiva estos métodos permiten remover gran cantidad de líquido, Marfisi y Salager (2004) citan además que en un medio de emulsión (agua/aceite) las gotas con cargas positivas y negativas tienden a colisionar entre sí a elevadas temperaturas.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Localización

La planta envasadora de gas Eni Ecuador donde se realizó la presente investigación se encuentra ubicada en la parroquia Pifo, cantón Quito, provincia de Pichincha.

Figura 9.

Localización de la Planta Pifo Eni Ecuador



Nota: La figura indica una fotografía aérea de la Planta Pifo. Tomado de Google Earth Pro

Sin embargo, los ensayos de los tratamientos se realizaron en dos localizaciones distintas debido a problemas de logística causados por la pandemia del coronavirus. La localización 1 se encuentra ubicada dentro de la provincia de Pichincha, cantón Rumiñahui, parroquia de Inchalillo, en un sector semiurbano y de clima subtropical. La localización 2 se encuentra en la provincia de Cotopaxi, cantón Pujilí, en un sector semiurbano y de clima templado, las imágenes satelitales de la ubicación de ambos lugares se encuentran en el *Anexo 5*.

4.2. Población y muestra de estudio

4.2.1. Población

Lodos procedentes de la PTAR de la planta Pifo de Eni Ecuador. Este residuo se almacena por tres meses en cilindros metálicos de 55 galones, con diámetro de 58.5 cm y 89.1 cm de altura hasta que finalmente son entregados al gestor ambiental certificado para su tratamiento final (incineración) debido a que está catalogado como residuo peligroso, ver *Anexo 4*. Es importante recalcar que los cilindros se encuentran ubicados en un lugar cerrado, con la respectiva señalética y ventilación, ver *Anexo 6*.

4.2.2. Muestra

Se elaboró una muestra compuesta tomando aproximadamente 45 litros de lodo de varios cilindros metálicos que se encontraban almacenados por tres meses, cabe mencionar que las muestras fueron homogéneas.

4.3. Tratamientos

Los lodos fueron sometidos a tres tratamientos con el fin de determinar aquel que sea más eficiente para su deshidratación. Estos métodos fueron elegidos en base a la bibliografía encontrada y se tomó también en consideración tiempo y recursos.

Los ensayos de secado solar y filtración se realizaron en fechas distintas y tuvieron tiempos de duración distintos, debido a que como se mencionó anteriormente fueron realizados en dos localidades con condiciones ambientales diferentes; a continuación, se indica información resumida de los ensayos de cada tratamiento según la localidad donde fueron elaborados.

Tabla 2.

Resumen de los tratamientos estudiados según la localidad donde fueron realizados

<i>Tratamiento</i>	<i>Localidad</i>	<i>Número de ensayos</i>	<i>Inicio de los ensayos</i>	<i>Análisis de muestras</i>
Secado solar	Sangolquí	5	25/07/2020	11/08/2020
Filtración	Sangolquí	5	25/07/2020	11/08/2020
Tratamiento químico	Pujilí	5	10/08/2020	16/08/2020
Secado solar	Pujilí	5	28/07/2020	11/08/2020
Filtración	Pujilí	5	28/07/2020	11/08/2020

Nota: Se observa un resumen de los tratamientos realizados, su localización, número de ensayos y las fechas de inicio de los mismos y de los análisis realizados a las muestras.

El análisis del contenido de humedad en las muestras post tratamientos, así como el análisis de sólidos totales, fijos y volátiles estuvo condicionado a la disponibilidad de uso de los laboratorios debido a los protocolos de bioseguridad implementados en la Universidad Politécnica Salesiana.

El muestreo a los lodos y la ejecución de los ensayos fueron realizados con el adecuado uso de equipos de protección personal y seguridad en caso de emergencia, pues el lodo es inflamable.

Para la realización de la parte experimental de la presente investigación se procedió a la toma de pequeñas cantidades de lodo primero con la finalidad de evaluar y plantear posibles tratamientos a aplicarse y finalmente se realizó la toma de muestras para el desarrollo de la parte experimental.

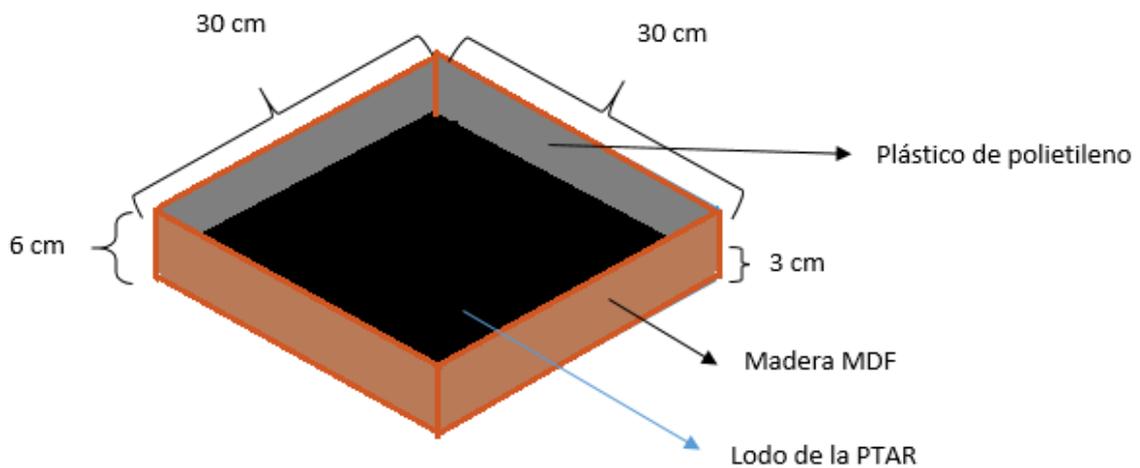
4.3.1. Secado solar o secado por convección natural

Se trata de un tratamiento físico, para el cual fueron usados 10 cajones de madera triplex de 0.5 cm de espesor con medidas de 30 cm de largo por 30 cm de ancho y 6 cm de alto, se les colocó una capa de plástico de polietileno de alta densidad con lo que se cubrió el interior de cada uno, con la finalidad de impermeabilizarlos y que el contenido de humedad inicial presente en los lodos no pueda ser absorbido por la madera.

Posteriormente se vertió dentro de cada cajón aproximadamente 2 litros de lodo y se procedió a colocarlos en un sitio altamente ventilado, se usó poliestireno como aislante entre el cajón y el suelo, así como una cubierta de plástico para evitar que la lluvia tenga contacto con el lodo alterando su contenido de humedad, ver *Anexo 7*.

Figura 10.

Esquema de cajones de madera para el tratamiento de secado solar



Nota: Se indica el esquema de cajones, usado en el tratamiento de secado solar.

Diariamente se obtuvieron datos de las condiciones meteorológicas tales como temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento, presión atmosférica y humedad relativa de las estaciones automáticas M5041 (Los Chillos) y M0004 (Rumipamba Salcedo) del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) que son las más cercanas a los sitios donde se localizaron los ensayos de esta experimentación, a través de su portal web. Sin embargo, los datos de radiación solar se pudieron obtener únicamente de la primera estación.

También se monitoreó a diario los pesos de cada cajón con la finalidad de obtener la tasa de evaporación resultante de este tratamiento a través del cálculo de la reducción de su masa como se observa en la **Ecuación 8**, debido a que las condiciones ambientales lograron que cierto porcentaje del contenido de humedad se evapore.

La duración de este tratamiento fue variable debido a que las condiciones ambientales de los sitios donde se localizaron los ensayos fueron distintas. Es importante mencionar que la culminación de este tratamiento se determinó cuantitativamente en función de las masas obtenidas, una vez que éstas comenzaron a ser constantes se consideró que el proceso de evaporación se detuvo. Las muestras fueron analizadas en el día 17 y en el día 14 después de haberse iniciado este tratamiento realizado en la localización 1 y localización 2 respectivamente.

4.3.1.1. Materiales

- Cajón de madera, dimensiones (30 cm x 30 cm x 6 cm de alto)
- Plástico de polietileno, 6 m²
- Cemento de contacto
- Tachuelas o clavos
- Capa aislante de poliestireno

4.3.2. Filtración

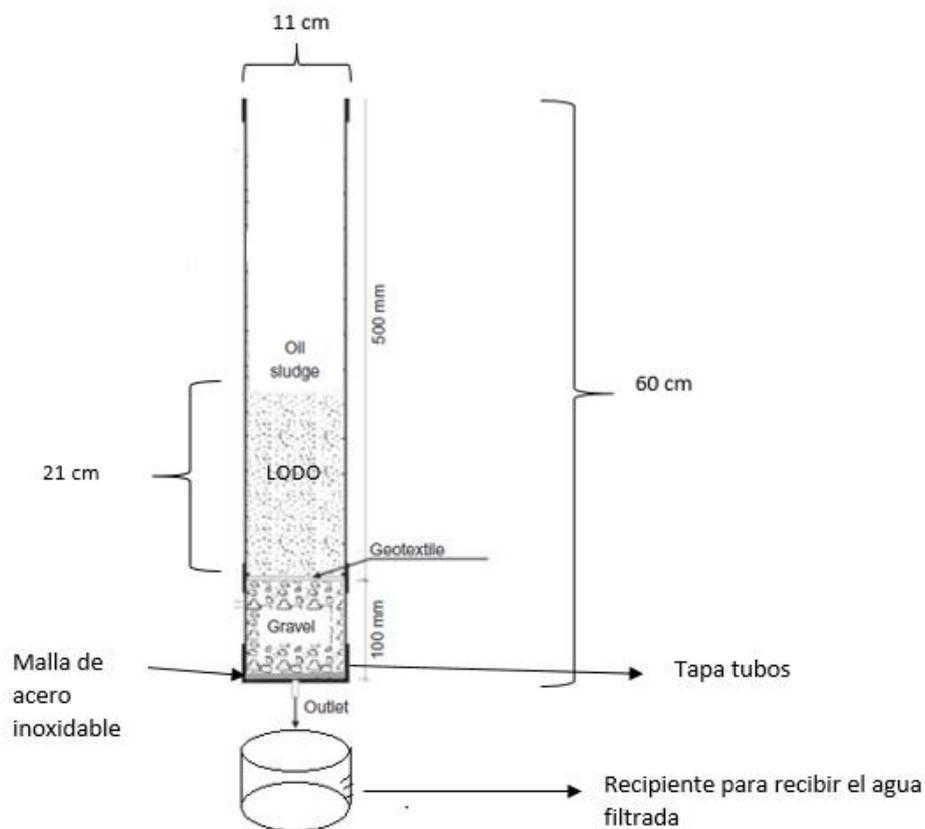
Dentro de este tratamiento también físico, se utilizaron 10 tubos de PVC de 0.11 m de diámetro por 0.60 m de largo. Primero se perforó con taladro los tapa tubos del mismo diámetro correspondiente a los tubos PVC mencionados, luego se colocó una malla de acero inoxidable dentro de los mismos y se procedió a colocarlos en un extremo del tubo, a continuación, se introdujo 0.10 m de grava fina en cada tubo con una capa de geotextil no tejido como medios filtrantes. Estos filtros fueron colocados encima de recipientes de plástico para contener el agua filtrada de cada tubo, misma que fue medida diariamente con probetas para obtener los mililitros de agua filtrada y posteriormente obtener la tasa de filtración de este tratamiento en base a la **Ecuación 10**.

Dentro de cada filtro se vertió aproximadamente 2 litros y las muestras de lodo que se quedaron sobre el medio filtrante fueron analizadas en los días 17 y 14 después de haberse iniciado este tratamiento realizado en la localización 1 y localización 2 respectivamente.

Es importante recalcar que la utilización de filtros en este tratamiento cumple la función de un lecho de secado a menor escala, el cual en base a los resultados obtenidos como tasa de filtración se dimensionará en caso de presentar la mayor remoción del porcentaje de contenido de humedad.

Figura 11.

Esquema de filtros



Nota: La figura indica el esquema utilizado para los filtros, usados en el tratamiento de filtración.

La realización de estos ensayos se localizó en bodegas cerradas donde la influencia del sol, radiación solar o ventilación fue reducida considerablemente. Este tratamiento representa el funcionamiento de un lecho de secado a escala menor.

La duración de este tratamiento estuvo sujeto a la cantidad de mililitros de agua filtrada de cada tubo diariamente, es decir que cuando se evidenció ausencia de agua en los contenedores colocados bajo los filtros, se determinó que el proceso de filtración finalizó.

4.3.2.1. Materiales

- 10 tubos PVC de 0.11 m de diámetro y 0.60 m de largo
- Malla de acero inoxidable, 1 m², mesh de 40 x 0.23 mm
- Grava fina, 10 kg
- Geotextil no tejido NT 3000, 1 m²
- Tapa tubos PVC hembra de 0.11 m de diámetro

4.3.3. Acondicionamiento químico

Dentro del análisis de este tratamiento se emplearon los mismos materiales que en el tratamiento del secado solar, ver **Figura 10**, con la diferencia de que para este análisis se acondicionó previamente al lodo con diferentes cantidades de cal viva y se colocó únicamente 1 litro por cada cajón. Se utilizaron 5 cajones para evaluar el desempeño de la cal con concentraciones del 20%, 40%, 60%, 80% y 100% respecto a la masa del lodo. Se determinó la tasa de evaporación de este tratamiento a partir de las mediciones de la pérdida de masa diaria por evaporación, así mismo se monitorearon las condiciones climáticas en la localización 2 donde se llevó a cabo su desarrollo. Las muestras de lodo seco fueron analizadas 7 días luego de haberse iniciado este tratamiento.

4.3.3.1. Materiales

- Cajón de madera, dimensiones (30 cm x 30 cm x 6 cm de alto)
- Plástico de polietileno, 6 m²
- Cemento de contacto
- Tachuelas o clavos
- Capa aislante de poliestireno
- 6 kg de cal viva

4.4. Metodología experimental

4.4.1. Contenido de humedad

Este análisis se llevó a cabo bajo la técnica establecida en la norma mexicana NMX-AA-016-1984, basándose en la cantidad de agua evaporada contenida en la muestra representativa, a continuación, se definen los pasos realizados, ver *Anexo 8*:

Primero se tararon los crisoles en la estufa por 60 minutos a 200 °C, hasta alcanzar un peso constante (peso A).

Posteriormente se introdujo aproximadamente 10 gramos en los crisoles de la muestra de a ser analizada, se procedió a pesar nuevamente (peso B). A continuación, se colocaron los crisoles con la muestra dentro de la estufa por 2 horas a 60 °C. Una vez transcurrido este tiempo, se procedió a colocar los crisoles con la muestra dentro del desecador por 30 minutos.

Finalmente se pesaron los crisoles (peso C).

Para el cálculo del contenido de humedad se realizó las siguientes operaciones:

$$\% \text{ Contenido de humedad} = \frac{((\text{peso B} - \text{peso A}) - (\text{peso C} - \text{peso A}))}{(\text{peso B} - \text{peso A})} \times 100$$

(3)

4.4.1.1. Materiales y equipos

Tabla 3.

Equipos y materiales usados para análisis de contenido de humedad

<i>Equipos</i>	<i>Marca-Modelo</i>	<i>Código</i>	<i>Materiales</i>
Estufa	Memmert	QUI-080	Crisol de porcelana
Balanza analítica	Mettler Toledo ML204	QUI-008	Espátula Desecador Pinza metálica Guantes termoprotectores

Nota: Se indican los materiales y equipos usados para el análisis de contenido de humedad.

4.4.2. Sólidos totales, fijos y volátiles

Este análisis fue utilizado para determinar la cantidad de sólidos totales, fijos y volátiles presentes en el agua obtenida del tratamiento de filtración. Se utilizaron las técnicas 2540 B. Sólidos totales secados a 103-105 °C y 2540 E. Sólidos fijos y volátiles incinerados a 550 °C indicadas en Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (1992), que se muestran a continuación, ver *Anexo 9*.

En primer lugar, se procedió a eliminar el contenido de humedad presente en los crisoles colocándolos en la estufa a 105 °C por 2 horas, luego se los puso dentro del desecador por 30 minutos y a continuación se los pesó en la balanza analítica (peso del crisol vacío).

Se vertió 50 mL de agua filtrada de cada localización en los crisoles los cuales fueron colocados en baño María hasta que se evapore su contenido. Posteriormente se introdujeron los crisoles en la estufa a 105 °C por 24 horas. Transcurrido este tiempo se ubicaron los crisoles en el desecador por 30 minutos y se los pesó (peso del crisol a 105 °C).

A continuación, se colocó a los crisoles en la mufla por 30 minutos a 550 °C, luego se los ubicó dentro del desecador por 30 minutos y finalmente se los pesó (peso del crisol a los 550 °C).

Para el cálculo de los sólidos totales se realizaron los cálculos detallados a continuación:

$$Sólidos\ totales = \frac{(peso\ del\ crisol\ a\ 105\ ^\circ C - peso\ del\ crisol\ vacío)}{Volúmen\ de\ la\ muestra} \quad (4)$$

Para el cálculo de los sólidos fijos se realizaron los cálculos detallados a continuación:

$$Sólidos\ fijos = \frac{(peso\ del\ crisol\ a\ 550\ ^\circ C - peso\ del\ crisol\ vacío)}{Volúmen\ de\ la\ muestra} \quad (5)$$

Por último, para el cálculo de los sólidos volátiles se utilizó la siguiente relación:

$$Sólidos\ volátiles = Sólidos\ totales - Sólidos\ fijos \quad (6)$$

4.4.2.1. Materiales y equipos

Tabla 4.

Equipos y materiales usados para análisis de sólidos totales, fijos y volátiles

<i>Equipos</i>	<i>Marca-Modelo</i>	<i>Código</i>	<i>Materiales</i>
Estufa	Memmert	QUI-080	Crisol de porcelana
Balanza analítica	Mettler Toledo ML204	QUI-008	Espátula
Mufla	Thermo scientific	QUI-019	Desecador
Baño María	Shel Lab	QAI-023	Pinza metálica Guantes termoprotectores

Nota: En la tabla se indican los materiales y equipos usados en los laboratorios de la UPS para el análisis de sólidos totales, fijos y volátiles.

4.4.3. Tasa de evaporación

Se define como la cantidad de agua que se evapora de una superficie de tierra o agua por unidad de tiempo (Organización Meteorológica Mundial, 2012), y se expresa en unidades de masa (g) / tiempo (minutos) * área (m²). Es importante mencionar que el proceso de evaporación ocurre por una serie de factores ambientales no solo por radiación (transferencia de calor) sino también por difusión (es el aire el que arrastra la masa de agua), el experimento se realizó bajo techo por lo que no fue necesario medir la precipitación. En la presente investigación fue necesario estimar el valor de esta magnitud diariamente y para ello se calculó la cantidad de masa evaporada expresada en gramos en intervalos de 24 horas, siendo esta la diferencia entre el peso final con el peso día anterior. También se necesitó determinar el área de los cajones, cuya forma geométrica es un cuadrado, expresada en m², como se puede observar a continuación:

$$\text{Área} = \text{lado} \times \text{lado} \tag{7}$$

A partir de la Ecuación (8), se calculó el área de los cajones con las medidas reales:

$$\text{Área} = 0.30 \text{ m} \times 0.30 \text{ m} = 0.09 \text{ m}^2$$

Una vez obtenido el área superficial y teniendo en cuenta que 24 horas son equivalentes a 1440 minutos, se procede a realizar los cálculos respectivos:

Ejemplo

Masa de agua evaporada en día 1 = 0.01 kg x 1000 (factor de conversión) = 10 g

$$\text{Tasa de evaporación} = \frac{10 \text{ g}}{1440 \text{ min} \times 0.09 \text{ m}^2} = 0.077 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \times \text{minuto}} \tag{8}$$

4.4.4. Tasa de filtración

La tasa de filtración es una magnitud que determina la cantidad de agua que pasa por el área o superficie de un medio filtrante en cierta cantidad de tiempo, normalmente se encuentra expresada en volumen (m³) / área (m²) * tiempo (hora),

El área de la superficie de los filtros es la siguiente:

$$A = \pi r^2 \quad (9)$$

$$A = \pi * 0.055^2 m^2$$
$$A = 9.5033 \times 10^{-3} m^2$$

El cálculo de esta magnitud fue diario, por ello se colocó 24 horas en el denominador, a continuación, se observan las operaciones realizadas para determinar la tasa de filtración:

Ejemplo

*En un día se filtró 60 mL ÷ 1 * 10⁶ (factor de conversión) = 6 * 10⁻⁵ m³*

$$Tasa\ de\ filtración = \frac{6 * 10^{-5} m^3}{9.5033 \times 10^{-3} m^2 \times 24 h} = 2.63 * 10^{-5} \frac{m^3}{m^2 \times hora} \quad (10)$$

4.4.5. Composición granulométrica

Este análisis fue realizado en las muestras de lodo seco del tratamiento del secado solar bajo la norma ASTM C136, con la finalidad de determinar su curva granulométrica, ver **Anexo 9**.

Primero se pesaron aproximadamente 200 gramos de muestra en un crisol de porcelana y luego se lo colocó en la estufa a 105 °C por 2 horas.

Después se procedió a pesar nuevamente la muestra. A continuación, se lavaron y secaron los tamices seleccionados para la práctica, y estos fueron pesados vacíos, así mismo, fueron colocados en función de su abertura de forma descendente en el equipo de tamizado, cabe mencionar que luego del último tamiz se situó el recipiente llamado fondo.

Posteriormente se dispuso la muestra de lodo en el primer tamiz y se procedió a cerrar con la tapa. El tamizador se configuró para estar en movimiento por 1 minuto.

Cuando se detuvo el tamizador se procedió a pesar nuevamente los tamices en la balanza.

4.4.5.1. Materiales y equipos

Tabla 5.

Materiales y equipos usados para determinación de composición granulométrica

<i>Equipos</i>	<i>Marca-Modelo</i>	<i>Código</i>	<i>Materiales</i>
Estufa	Memmert	QUI-080	Crisol de porcelana
Balanza analítica	Adam	80042000605997	Espátula
Tamizador	Advantech-Duratap	QUI-023	Desecador Pinza metálica Guantes termoprotectores

Nota: Se indican los materiales y equipos usados en los laboratorios de la UPS para el análisis de composición granulométrica.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Características del lodo

Los análisis de contenido de humedad, sólidos totales, fijos y volátiles, viscosidad, gravedad API y BS&W fueron realizados por los laboratorios ALS Corplab con acreditación N° OAE LE 2C 05-005 y UMWELT Cia. Ltda. con acreditación N° OAE LE 2C 06-006, con fechas 2020-07-24 y 2020-08-05 respectivamente, cuyos informes de resultados se encuentran en el *Anexo 2* y *Anexo 3*.

5.1.1. Contenido de humedad

Es la cantidad de agua contenida en un material medida sobre la base de análisis volumétricos o gravimétricos y se expresa en porcentaje generalmente (Montalvan, 2020). Se puede definir el contenido volumétrico de agua como la división entre el volumen de agua sobre el volumen total el cual suma el volumen de agua, suelo y espacio vacío contenido dentro del mismo material.

También es posible definir el contenido de humedad en base a su masa, es decir su contenido gravimétrico de agua, mismo que se definiría como la división de la masa de agua sobre la masa del material en bruto.

Para convertir el contenido gravimétrico de agua a contenido volumétrico de agua se multiplica el contenido gravimétrico por la gravedad específica del material en bruto (Lambe, 1969).

El valor de contenido de humedad presente en los lodos de la PTAR obtenido fue de 36.59 % y fue realizado por el laboratorio ALS bajo la norma NMX-AA-16-1984.

5.1.2. Sólidos totales:

Materia sólida que está suspendida, disuelta, o asentada en un líquido, tal como el agua, las aguas residuales, la leche, entre otros y que permanecen luego del secado de una muestra a 103 °C-105 °C (Boletín agrario, 2020).

Este valor fue obtenido fue de 62.83 mg/L y fue realizado por el laboratorio ALS bajo la metodología Standard Methods Ed. 23, 2017, 2540 A y 2540 B con ± 0.10 % de incertidumbre.

5.1.3. Sólidos volátiles:

El contenido de sólidos volátiles se interpreta en términos de materia orgánica, se considera que a 550 ± 50 °C la materia orgánica se oxida y se forma gas carbónico y el agua se volatiliza, sin embargo, la interpretación no es exacta puesto que la pérdida de peso incluye también pérdidas debido a descomposición o volatilización de ciertas sales minerales (Glosario Medio Ambiente, 2020).

Este valor fue obtenido fue de 6.71 mg/L y fue realizado por el laboratorio ALS bajo la metodología Standard Methods Ed. 23, 2017, 2540 E con ± 0.10 % de incertidumbre.

5.1.4. Sólidos fijos:

Son sólidos totales, suspendidos o disueltos que quedan en una muestra después de la ignición durante un tiempo específico a una temperatura específica (Standard Methods, 2017).

Este valor fue obtenido fue de 56.12 mg/L y fue realizado por el laboratorio ALS bajo la metodología Standard Methods Ed. 23, 2017, 2540 E con ± 0.10 % de incertidumbre.

5.1.5. Viscosidad

Cuantifica la resistencia interna al flujo de un fluido, esta resistencia se produce debido al frotamiento de las moléculas que se deslizan unas contra otras. La viscosidad es un parámetro que influye en la potencial emisión de contaminantes dado que es una determinante en las condiciones de la combustión (Alonso, 2012).

La conformación química del crudo determina la magnitud de la viscosidad, es decir que, a mayor proporción de fracciones ligeras, menor es la viscosidad. Este parámetro se encuentra también en función de la temperatura ambiente siendo inversamente proporcional a la misma.

El valor de viscosidad obtenido fue de 1.16 cSt y fue realizado por el laboratorio Umwelt, bajo el método ASTM D445.

5.1.6. Gravedad API

Consiste en una escala de gravedad específica desarrollada por API (Instituto Estadounidense del Petróleo, por sus siglas en inglés), donde se mide la densidad relativa de diversos líquidos de petróleo, expresada en grados. Se encuentra graduada en grados en un instrumento llamado hidrómetro y fue diseñado para que la mayoría de los valores quedaran entre 10 y 70 grados de gravedad API (Schlumberger, 2020).

La fórmula utilizada para obtener este valor es:

$$Gravedad\ API = \left(\frac{141.5}{Gravedad\ específica\ del\ fluido\ a\ 60\ ^\circ F} \right) - 131.5 \quad (11)$$

El valor obtenido fue de 13.77 °API y fue realizado por el laboratorio Umwelt, bajo el método ASTM 287-12b.

5.1.7. BS&W

Sus siglas en español significan sedimento básico y agua, se mide a partir de una muestra líquida de la corriente de producción que incluye agua libre, sedimento y emulsión. Este parámetro se expresa como porcentaje en volumen de la corriente de producción (Schlumberger, 2020).

En la industria del petróleo es importante que este valor sea bajo para evitar dificultades debido a la suciedad durante el procesamiento del crudo, ya que pueden dañar el horno al evaporarse toda el agua libre (ENAP, 2020).

Los valores obtenidos en base al análisis realizado por el laboratorio Umwelt bajo el método ASTM D96-88, son los siguientes:

Tabla 6.

Resultados de análisis BS&W

<i>Unidad</i>	<i>Valores</i>
% Vol Sedimentos	38.9
% Vol Acuoso	52.2
% Vol Hidrocarburo	8.8

Nota: La presente tabla indica el valor obtenido de volumen de sedimentos, acuoso e hidrocarburo presentes en el lodo. Tomado del análisis realizado por (Umwelt, 2020)

5.1.8. pH

El análisis de pH se utiliza para determinar la acidez o alcalinidad de una disolución (Chang y Goldsby, 2013). Se determinó que el lodo posee un pH de 5.8.

5.1.9. Oxígeno disuelto

El análisis electrométrico de oxígeno disuelto consiste en la medición de la tasa de difusión del oxígeno molecular a través de una membrana plástica permeable al oxígeno, que recubre el elemento sensible de un electrodo y actúa como una barrera de difusión contra muchas impurezas que interfieren en los otros métodos para la determinación del OD (IDEAM, 2007).

El valor obtenido fue de 12.29 mg/L en base al análisis realizado en la Universidad Politécnica Salesiana.

5.2. Evaluación de los tratamientos

5.2.1. Secado solar

Para el análisis de los resultados de este tratamiento se monitorearon las condiciones ambientales diariamente durante los 16 días en la localidad 1 y durante los 13 días en la localidad 2, obteniéndose una matriz de datos promedio de los valores horarios para cada día, como se puede observar en las siguientes tablas.

Tabla 7.

Condiciones climáticas en localización 1 en el tratamiento de secado solar

Día	Temperatura aire (°C)	Radiación solar global (W/m²)	Velocidad del viento (m/s)	Presión atmosférica (hPa)	Humedad relativa (%)
0	15.88	202.24	0.85	759.65	73.70
1	16.52	231.79	1.47	760.05	68.20
2	16.49	242.55	1.46	760.22	65.57
3	15.95	266.35	1.77	759.89	57.70
4	15.87	116.43	0.79	759.45	63.06
5	17.33	196.99	1.10	759.25	62.91
6	17.45	222.03	1.57	759.63	52.37
7	17.30	303.59	2.14	760.11	50.10
8	17.49	304.29	2.11	760.25	45.76
9	17.06	305.97	1.72	760.78	47.97
10	16.88	297.64	1.75	760.94	46.51
11	16.30	235.86	1.53	759.98	51.00
12	15.38	154.27	1.39	759.41	63.46
13	17.43	300.16	1.87	759.44	51.06
14	17.84	303.00	1.72	759.75	48.68
15	17.81	293.52	1.67	759.90	47.60
16	17.29	288.39	1.27	758.91	55.56

Nota: La presente tabla indican los datos obtenidos de los parámetros analizados de la estación M5041. Tomado de (INAMHI, 2020).

Tabla 8.*Condiciones climáticas en localización 2 en el tratamiento de secado solar*

<i>Día</i>	<i>Temperatura aire (°C)</i>	<i>Velocidad del viento (m/s)</i>	<i>Presión atmosférica (hPa)</i>	<i>Humedad relativa (%)</i>
<i>0</i>	12.02	160.15	741.60	73.26
<i>1</i>	11.59	160.48	740.61	75.61
<i>2</i>	12.06	174.46	741.45	74.85
<i>3</i>	13.51	178.67	739.23	77.96
<i>4</i>	15.10	161.27	737.99	74.50
<i>5</i>	14.23	172.73	738.05	74.57
<i>6</i>	13.11	154.28	740.78	76.32
<i>7</i>	12.18	157.42	742.22	64.88
<i>8</i>	11.85	162.88	740.92	71.58
<i>9</i>	12.11	160.25	740.05	83.33
<i>10</i>	11.06	160.71	741.16	78.21
<i>11</i>	11.30	176.00	741.71	73.21
<i>12</i>	12.81	172.92	741.18	75.42
<i>13</i>	12.60	154.38	739.97	76.83

Nota: En la presente tabla se indican los datos obtenidos de los parámetros analizados de la estación M0004. Tomado de (INAMHI, 2020).

Si bien en la presente investigación no se determinó cuál de estas condiciones climáticas posee mayor influencia sobre el secado solar, los valores reportados en la **Tabla 8** permitieron detectar diferencias significativas, por ejemplo, entre la temperatura del aire (°C) y la velocidad del viento (m/s), de ambas localizaciones.

A partir de la medición diaria de la masa de los cajones expresada en kilogramos, se obtuvo una matriz de datos para las dos ubicaciones:

Tabla 9.*Masas diarias de cajones (kg) en la localización 1, tratamiento de secado solar*

<i># de cajón / Día</i>	<i>Día 0 (kg)</i>	<i>Día 1 (kg)</i>	<i>Día 2 (kg)</i>	<i>Día 3 (kg)</i>	<i>Día 4 (kg)</i>	<i>Día 5 (kg)</i>	<i>Día 6 (kg)</i>	<i>Día 7 (kg)</i>	<i>Día 8 (kg)</i>	<i>Día 9 (kg)</i>	<i>Día 10 (kg)</i>	<i>Día 11 (kg)</i>	<i>Día 12 (kg)</i>	<i>Día 13 (kg)</i>	<i>Día 14 (kg)</i>	<i>Día 15 (kg)</i>	<i>Día 16 (kg)</i>
1	1.68	1.58	1.53	1.40	1.37	1.18	0.90	0.74	0.72	0.72	0.71	0.72	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
2	1.7	1.6	1.4	1.17	0.95	0.88	0.85	0.83	0.83	0.83	0.82	0.83	0.83	0.82	0.82	0.82	0.82
3	1.73	1.63	1.48	1.29	1.04	0.89	0.66	0.59	0.59	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
4	1.75	1.63	1.55	1.44	1.16	1.13	0.86	0.82	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
5	1.775	1.665	1.545	1.31	1.17	1.09	0.95	0.87	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
Promedios	1.73	1.62	1.50	1.32	1.14	1.03	0.84	0.77	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.75	0.75	0.75

Nota: En la presente tabla se indican los datos obtenidos de masa (kg) de los cajones usados en la localización 1.**Tabla 10.***Masas diarias de cajones (kg) en la localización 2, tratamiento de secado solar*

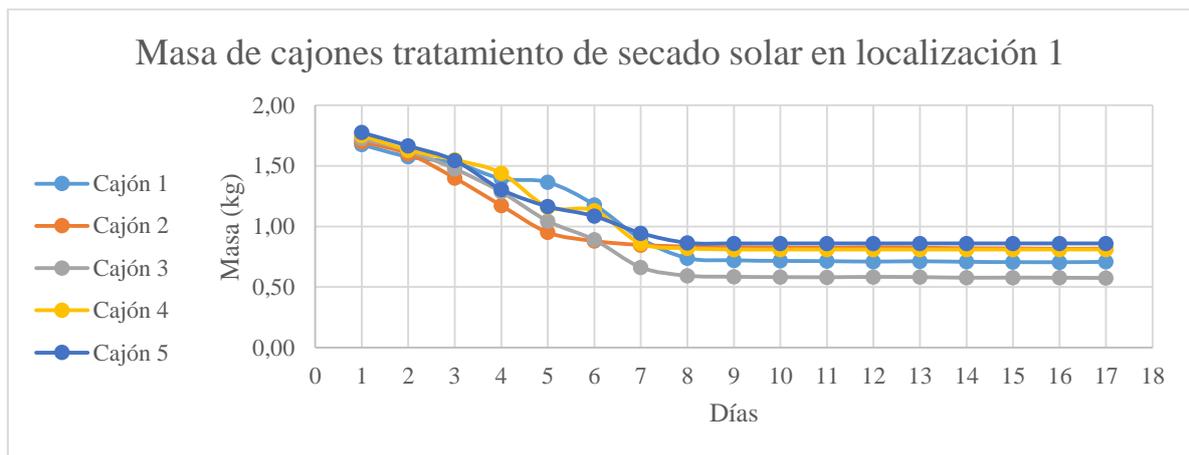
<i># de cajón / Día</i>	<i>Día 0 (kg)</i>	<i>Día 1 (kg)</i>	<i>Día 2 (kg)</i>	<i>Día 3 (kg)</i>	<i>Día 4 (kg)</i>	<i>Día 5 (kg)</i>	<i>Día 6 (kg)</i>	<i>Día 7 (kg)</i>	<i>Día 8 (kg)</i>	<i>Día 9 (kg)</i>	<i>Día 10 (kg)</i>	<i>Día 11 (kg)</i>	<i>Día 12 (kg)</i>	<i>Día 13 (kg)</i>
6	2,46	2,11	1,98	1,75	1,43	1,39	1,39	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34
7	2,41	2,11	2,02	1,75	1,47	1,34	1,34	1,34	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
8	2,45	2,15	2,10	1,78	1,51	1,37	1,37	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33
9	2,49	2,18	2,14	2,00	1,68	1,55	1,50	1,50	1,50	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46
10	2,46	2,20	2,11	1,84	1,57	1,39	1,39	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34
Promedios	2,45	2,15	2,07	1,82	1,53	1,41	1,40	1,37	1,36	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35

Nota: En la presente tabla se indican los datos obtenidos de masa (kg) de los cajones usados en la localización 2.

Las masas diarias de cajones (kg) en la localización 1 comenzaron a mantenerse constantes a partir del día 8 en su mayoría, en el caso de la localización 2 este mismo comportamiento se observó a partir del día 7 en 3 de los 5 cajones.

Figura 12.

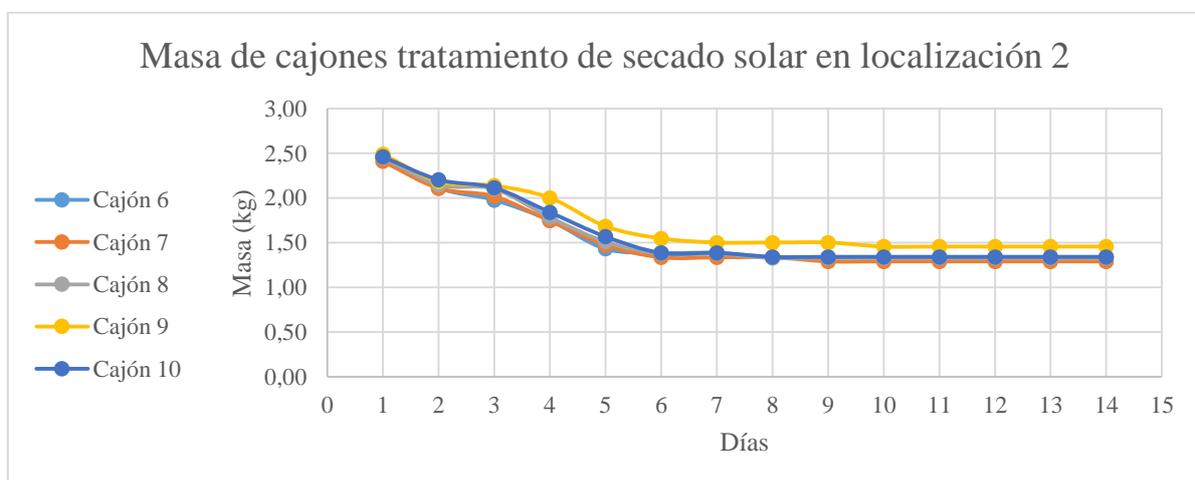
Masas diarias de cajones (kg) en localización 1, tratamiento de secado solar



Nota: Se puede observar el comportamiento de la masa de los cajones respecto al tiempo en la localización 1.

Figura 13.

Masas diarias de cajones (kg) en localización 2, tratamiento de secado solar

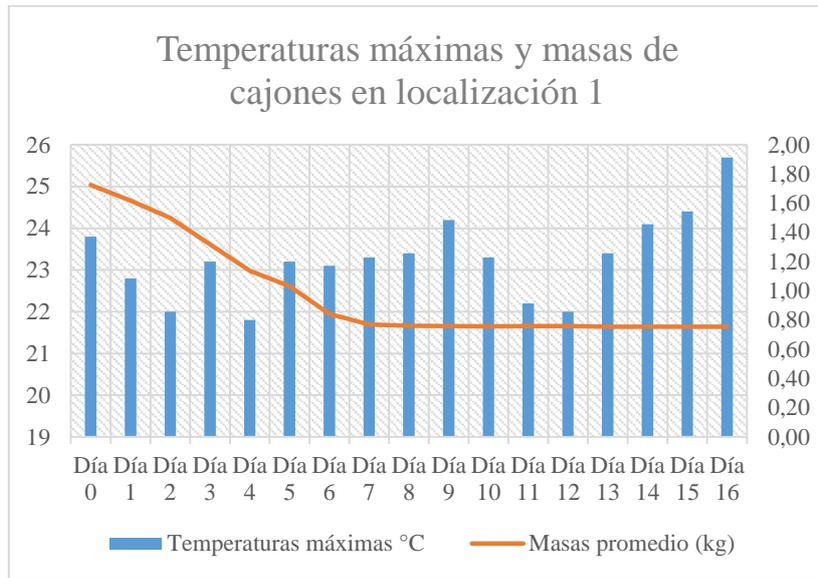


Nota: En la presente figura se indica el comportamiento de la masa de los cajones respecto al tiempo en la localización 2.

Los cajones entre ambas localizaciones poseen curvas de masa similares entre ellos, sin embargo el cajón N° 3 de la localización 1 disminuyó de manera notable y logró obtener un 66.67 % de reducción de su peso, en contraste con el desempeño del resto de cajones cuyas reducciones oscilaron entre 53% en la localización 1 y 45% en la localización 2.

Figura 14.

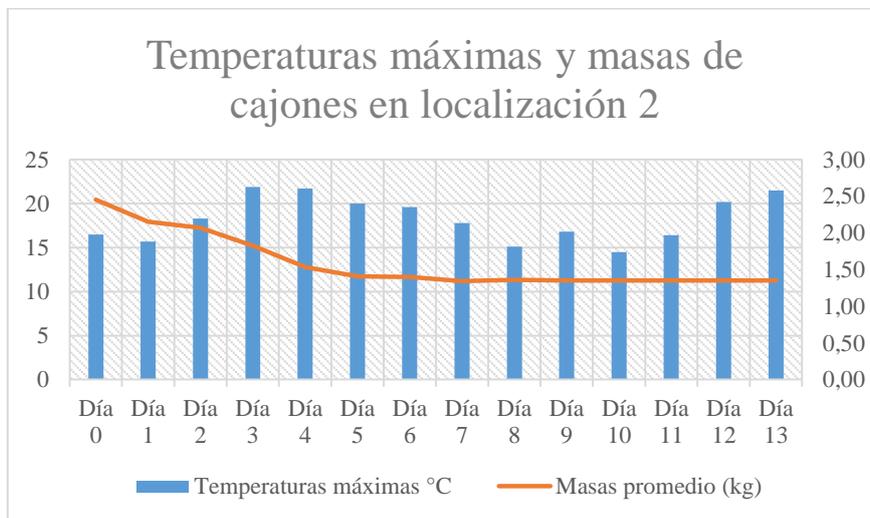
Masas promedio (kg) y temperaturas máximas (°C) en localización 1, tratamiento de secado solar



Nota: Se observa las masas de los cajones obtenidas a lo largo de la realización del tratamiento de secado solar con las temperaturas máximas obtenidas en los mismos días en la localización 1.

Figura 15.

Masas promedio (kg) y temperaturas máximas (°C) en localización 2, tratamiento de secado solar

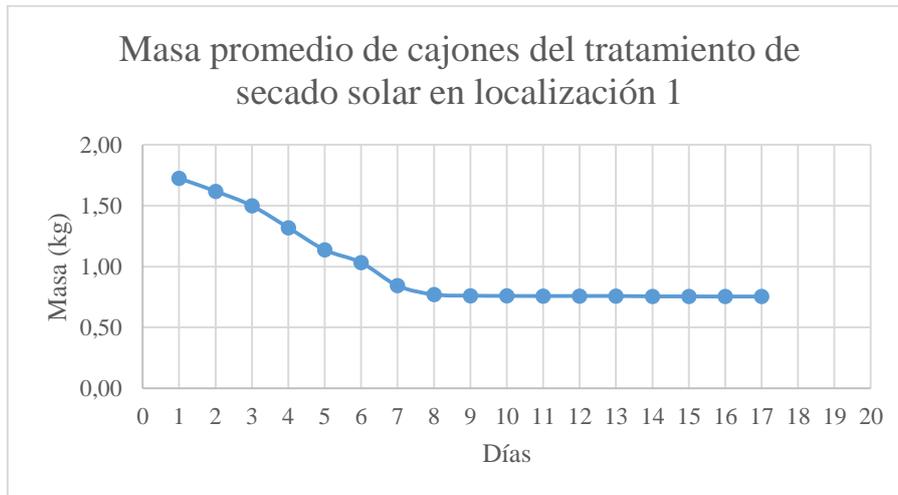


Nota: Se observa las masas de los cajones obtenidas a lo largo de la realización del tratamiento de secado solar con las temperaturas máximas obtenidas en los mismos días en la localización 2.

Se puede observar que, en ambas localizaciones al presentarse temperaturas máximas elevadas, las curvas de masas de cajones presentaron pendientes pronunciadas, mientras que al disminuir los grados de temperatura, las curvas de masa si bien sí presentan una pendiente, no evidenciaron mayor cambio con respecto al tiempo.

Figura 16.

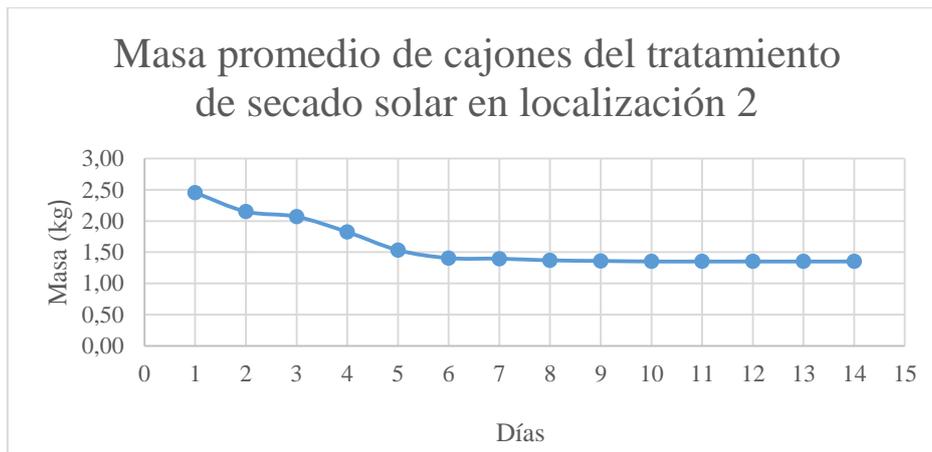
Masa promedio de cajones en localización 1



Nota: Se observa el promedio de las masas de los cajones en la localización 1.

Figura 17.

Masa promedio de cajones en localización 2

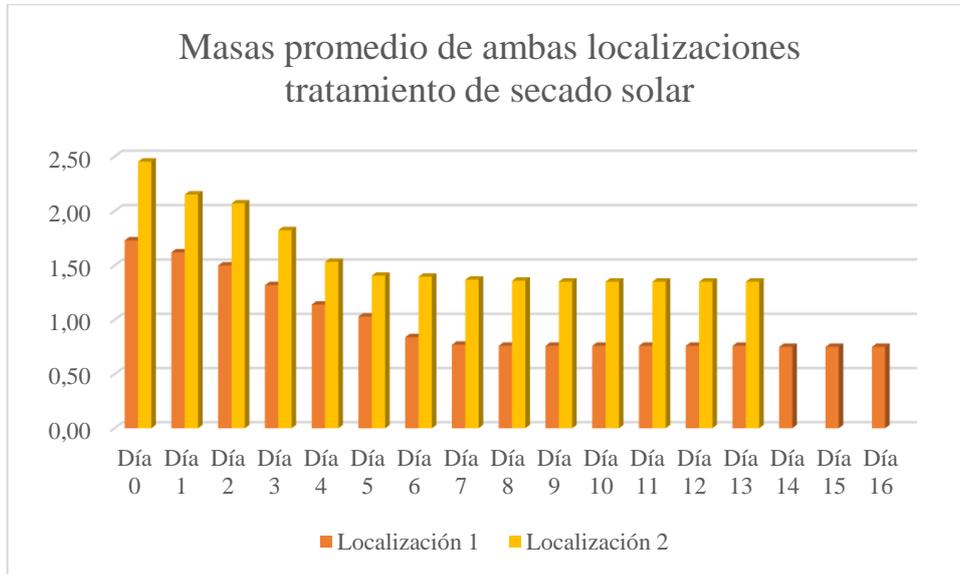


Nota: Se observa el promedio de las masas de los cajones en la localización 2.

Se puede apreciar que el punto en el que ambas curvas de masa comenzaron a ser constante es aproximadamente en el día 7.

Figura 18.

Masas obtenidas (kg) en ambas localizaciones, tratamiento de secado solar



Nota: En la figura se observa el mismo comportamiento de las masas de los cajones en ambas localizaciones.

Los ensayos realizados en este tratamiento si bien tuvieron diferente número de días, se denota que en ambas localizaciones se logró obtener una masa constante a partir del día 6 en los cajones, lo que indicó que el proceso de evaporación se detuvo.

En base a los valores que se reflejan en las **Tablas 9 y 10** se obtuvo una matriz de datos con la masa de agua evaporada diariamente en kilogramos de ambas localizaciones.

Tabla 11.*Masa evaporada (kg) en localización 1, tratamiento de secado solar*

# de cajón / día	Día 0 (kg)	Día 1 (kg)	Día 2 (kg)	Día 3 (kg)	Día 4 (kg)	Día 5 (kg)	Día 6 (kg)	Día 7 (kg)	Día 8 (kg)	Día 9 (kg)	Día 10 (kg)	Día 11 (kg)	Día 12 (kg)	Día 13 (kg)	Día 14 (kg)	Día 15 (kg)	Día 16 (kg)
1	0.00	0.01	0.05	0.13	0.03	0.19	0.28	0.16	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.02	0.20	0.23	0.22	0.07	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.05	0.15	0.19	0.24	0.15	0.23	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.11	0.08	0.11	0.28	0.03	0.27	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.13	0.12	0.24	0.14	0.08	0.14	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Promedios	0.00	0.06	0.12	0.18	0.18	0.10	0.19	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

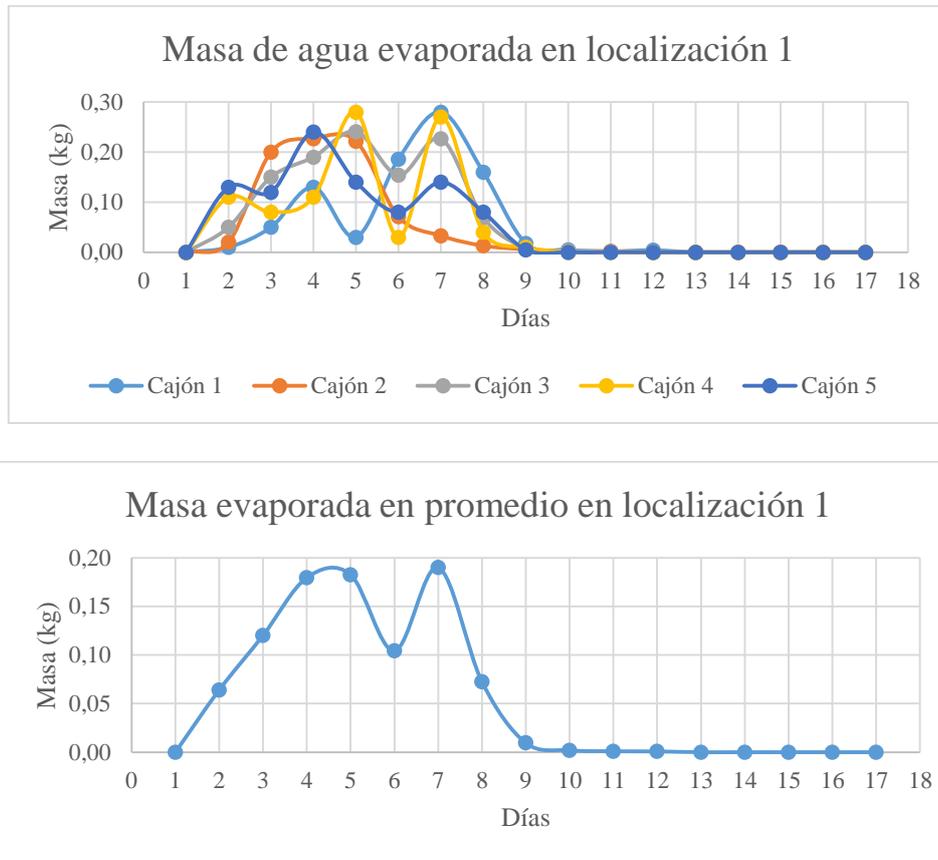
*Nota: En la presente tabla se indica los valores de masa evaporada (kg) en la localización 1.***Tabla 12.***Masa evaporada (kg) en localización 2, tratamiento de secado solar*

# de cajón / Día	Día 0 (kg)	Día 1 (kg)	Día 2 (kg)	Día 3 (kg)	Día 4 (kg)	Día 5 (kg)	Día 6 (kg)	Día 7 (kg)	Día 8 (kg)	Día 9 (kg)	Día 10 (kg)	Día 11 (kg)	Día 12 (kg)	Día 13 (kg)
6	0.00	0.35	0.14	0.23	0.32	0.05	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.30	0.09	0.27	0.27	0.14	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.30	0.05	0.32	0.27	0.14	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.31	0.05	0.14	0.32	0.14	0.05	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.26	0.09	0.27	0.27	0.18	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Promedios	0.00	0.30	0.08	0.25	0.29	0.13	0.01	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

Nota: En la presente tabla se indica los valores de masa evaporada (kg) en la localización 2.

Figura 19.

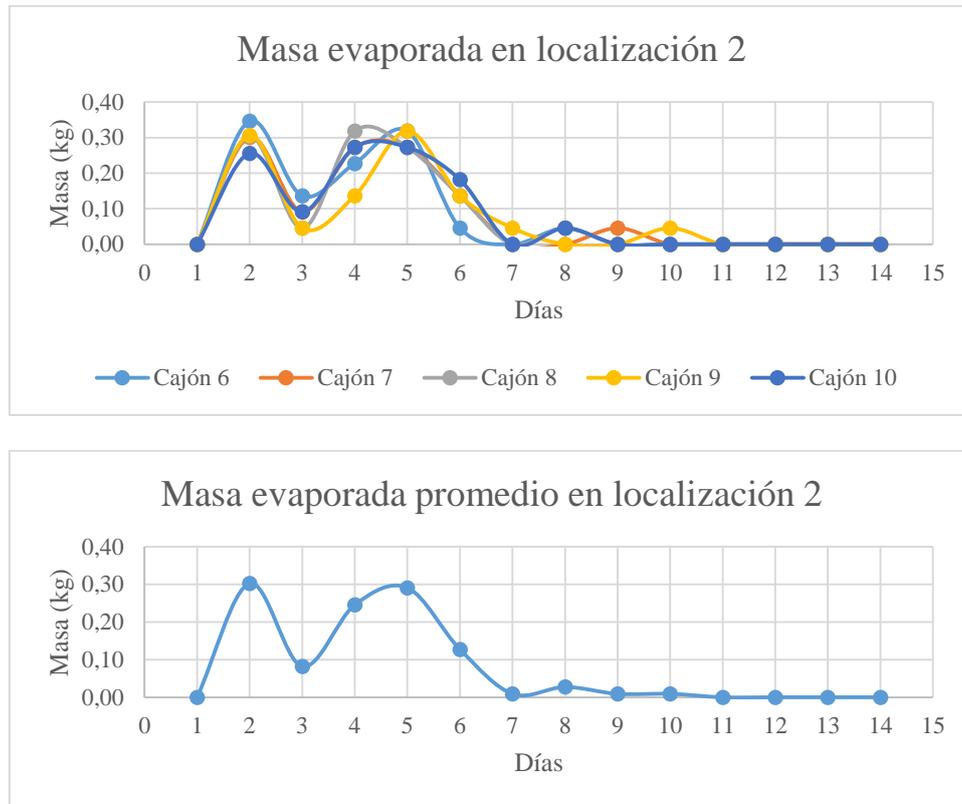
Masa evaporada (kg) en promedio y de cada cajón localización 1, tratamiento de secado solar



Nota: En la presente figura se indica el comportamiento de masa evaporada en los diferentes cajones y los valores promedio de masa evaporada (kg) en la localización 1.

Figura 20.

Masa evaporada (kg) en promedio y de cada cajón localización 2, tratamiento de secado solar



Nota: En la presente figura se indica el comportamiento de masa evaporada en los diferentes cajones y los valores promedio de masa evaporada (kg) en la localización 2.

Se observó un comportamiento más uniforme dentro de la localización 2 en cuanto a las curvas de masa evaporadas de cada cajón frente a las curvas obtenidas en la localización 1.

Una vez obtenidos los valores de masa evaporada en función del tiempo se obtiene la siguiente matriz de datos acerca de la tasa de evaporación ocurrida en cada cajón, de cada localización.

Tabla 13.*Tasas de evaporación (g/m² x minuto) en localización 1, tratamiento de secado solar*

# de cajón / Día	Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12	Día 13	Día 14	Día 15	Día 16
1	0	0.77	0.39	1.00	0.23	1.44	2.16	1.23	0.14	0.04	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0	0.77	1.54	1.75	1.71	0.55	0.25	0.10	0.05	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0	0.77	1.16	1.47	1.86	1.19	1.75	0.53	0.07	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0	0.93	0.62	0.85	2.16	0.23	2.08	0.31	0.08	0.93	0.62	0.85	2.16	0.23	2.08	0.31	0.00
5	0	0.85	0.93	1.85	1.08	0.62	1.08	0.62	0.04	0.85	0.93	1.85	1.08	0.62	1.08	0.62	0.00

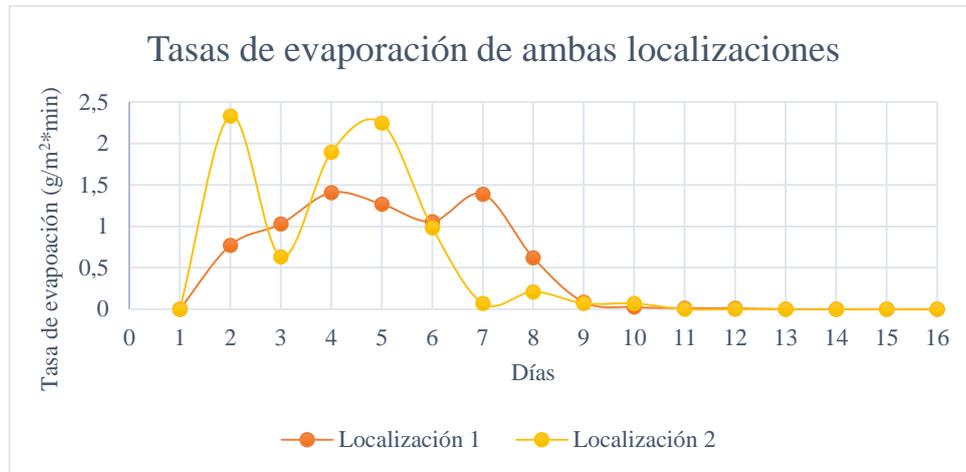
Nota: Se observan las tasas de evaporación obtenidas de cada cajón en la localización 1.**Tabla 14.***Tasas de evaporación (g/m² x minuto) en localización 2, tratamiento de secado solar*

# de cajón / Día	Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12	Día 13
6	0	2,67	1,05	1,75	2,46	0,35	0,00	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0	2,32	0,70	2,10	2,10	1,05	0,00	0,00	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0	2,34	0,35	2,46	2,10	1,05	0,00	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0	2,36	0,35	1,05	2,46	1,05	0,35	0,00	0,00	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0	1,97	0,70	2,10	2,10	1,40	0,00	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Nota: Se observan las tasas de evaporación obtenidas de cada cajón en la localización 2.

Figura 21.

Tasas de evaporación obtenidas de ambas localizaciones



Nota: Se observan las tasas de evaporación obtenidas en promedio de ambas localizaciones.

Se puede apreciar que en la localización 1 no existieron valores que indiquen cambios abruptos en su tasa de evaporación como se observa que ocurrieron en la localización 2.

Se calculó el promedio de las tasas de evaporación de cada cajón en la localización 1, se obtuvo un valor estimado de $0.80 \frac{g}{m^2 \times minuto}$ y en la localización 2 se obtuvo un valor estimado de $1.38 \frac{g}{m^2 \times minuto}$.

Finalmente, se determinó el contenido de humedad final presente en las muestras de lodo seco de la localización 1 y 2, cabe mencionar que el valor obtenido de contenido de humedad inicial fue del 36.59 %:

Tabla 15.

Contenido de humedad final localización 1, tratamiento de secado solar

# Cajón	% Contenido de humedad final (Día 17)
1	1.00
2	0.70
3	1.63
4	1.38
5	1.74

Nota: En la presente tabla se observan los valores de porcentaje de contenido de humedad final de cada cajón en el tratamiento de secado solar en la localización 1.

Tabla 16.

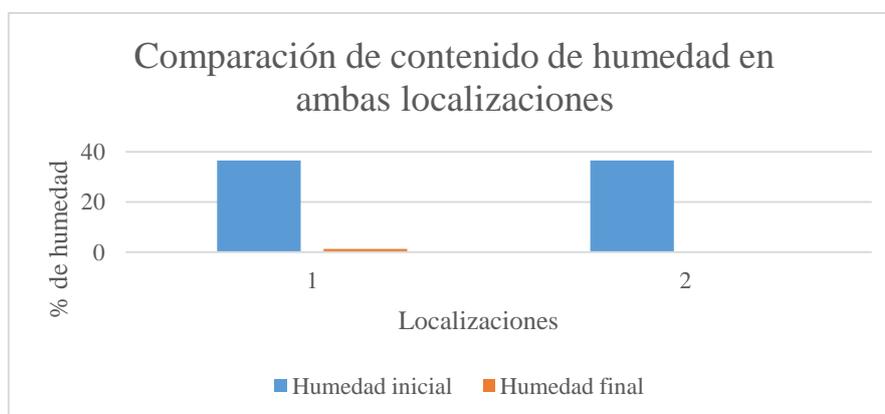
Contenido de humedad final localización 2, tratamiento de secado solar

# Cajón	% Contenido de humedad final (Día 14)
6	0.43
7	0.28
8	0.09
9	0.44
10	0.47

Nota: En la presente tabla se observan los valores de porcentaje de contenido de humedad final de cada cajón en el tratamiento de secado solar en la localización 2.

Figura 22.

Comparación de resultados obtenidos de contenido de humedad inicial y final en tratamiento de secado solar de ambas localizaciones



Nota: En la presente figura se observan los valores de porcentaje de contenido de humedad inicial y final de ambas localizaciones en el tratamiento de secado solar.

El porcentaje de contenido de humedad final en la localización 2 presentó un valor inferior al que se obtuvo en la localización 1.

5.2.1.1. Curva granulométrica

Tabla 17.

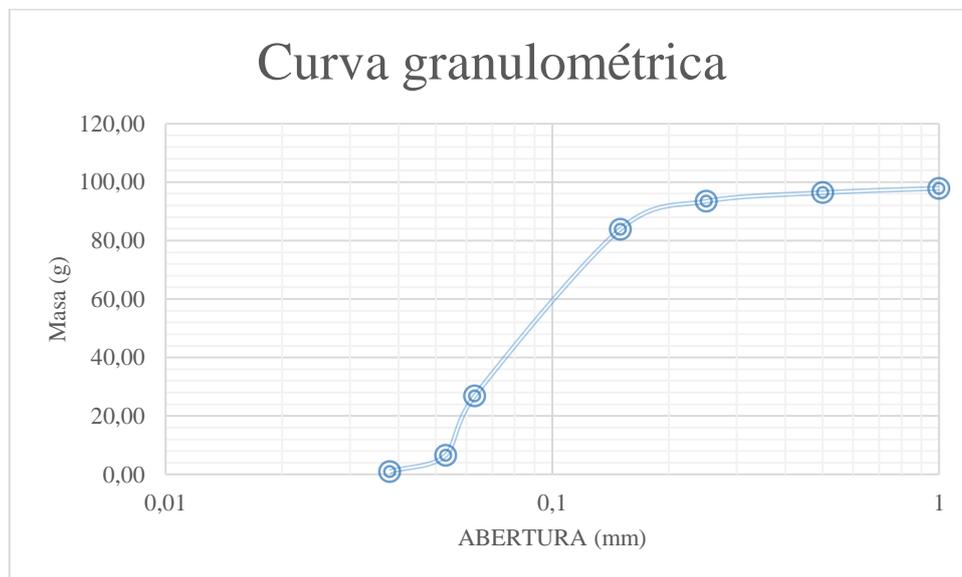
Análisis de composición granulométrica

Nº Tamiz	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
18	1.00	4.0	2.10	2.10	97.90
35	0.50	2.90	1.52	3.63	96.37
60	0.25	5.60	2.94	6.57	93.43
100	0.15	18.10	9.51	16.08	83.92
230	0.06	108.60	57.07	73.15	26.85
270	0.05	38.70	20.34	93.48	6.52
400	0.04	10.50	5.52	99.00	1.00
Fondo		1.90	1.00	100	
		190.30			

Nota: Se observan los valores obtenidos de masas retenidas en cada tamiz para el análisis de composición granulométrica de la muestra de lodo seco.

Figura 23.

Curva granulométrica



Nota: En la presente figura se observa la curva granulométrica de la muestra de lodo seco.

La curva granulométrica se la realizó tras la finalización del tratamiento de secado solar, es decir con lodo seco, la curva representa el tamaño de partículas de lodo seco, como resultado se obtuvo que los tamices que dejaron pasar el mayor porcentaje de masa son el N° 18, 35, 68 y 100, por lo tanto, se determinó que el diámetro de malla para realizar el tratamiento de filtración puede ser de 0.06 a 0.04 mm puesto que el diámetro de las partículas en su mayoría fue de hasta 0.15 mm.

5.2.2. Filtración

Los resultados obtenidos dentro del análisis de este tratamiento incluyen la cantidad de mililitros filtrados diariamente, valores de los análisis de sólidos totales, fijos y volátiles, así como el contenido de humedad final post tratamiento y la tasa de filtración obtenida. Cabe recalcar que el desarrollo de este procedimiento también fue ubicado en las dos localizaciones con duraciones también diferentes, ver **Tabla 2**.

La cantidad de mililitros obtenida en cada localización se detallan a continuación:

Tabla 18.*Militros filtrados en localización 1*

# Filtro	Día 1 (mL)	Día 2 (mL)	Día 3 (mL)	Día 4 (mL)	Día 5 (mL)	Día 6 (mL)	Día 7 (mL)	Día 8 (mL)	Día 9 (mL)	Día 10 (mL)	Día 11 (mL)	Día 12 (mL)	Día 13 (mL)	Día 14 (mL)	Día 15 (mL)	Día 16 (mL)
1	673	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	182	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	568	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	723	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Promedio	689.20	0.40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: En la presente tabla se observan los valores de mililitros obtenidos diariamente en cada filtro en la localización 1.

Tabla 19.*Militros filtrados en localización 2*

# Filtro	Día 1 (mL)	Día 2 (mL)	Día 3 (mL)	Día 4 (mL)	Día 5 (mL)	Día 6 (mL)	Día 7 (mL)	Día 8 (mL)	Día 9 (mL)	Día 10 (mL)	Día 11 (mL)	Día 12 (mL)	Día 13 (mL)
6	100	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	50	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	150	20	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0
Promedio	110	14	0	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: En la presente tabla se observan los valores de mililitros obtenidos diariamente en cada filtro en la localización 2.

Como se puede observar en la localización 1 el proceso de filtración duró 1 día en general mientras que en la localización 2 se encontró líquido en los recipientes hasta 5 días luego de haber iniciado el tratamiento en algunos casos.

Figura 24.

Mililitros obtenidos de cada filtro de localización 1 en tratamiento de filtración



Nota: Se observa el comportamiento el proceso de filtración en cada filtro en la localización 1.

Figura 25.

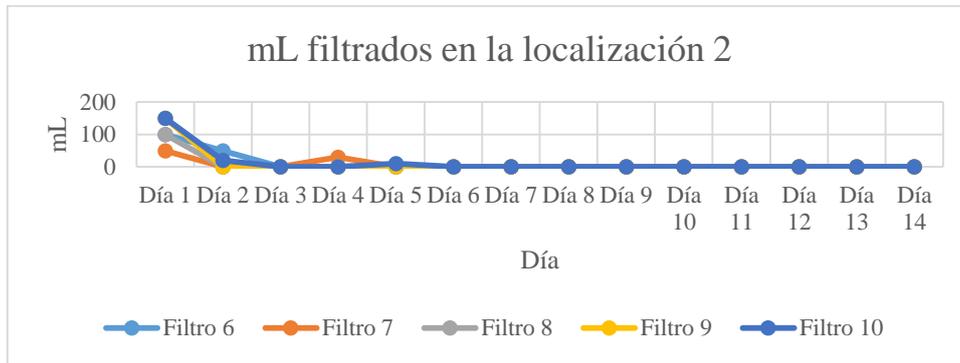
Mililitros filtrados en promedio obtenidos de tratamiento de filtración en localización 1



Nota: Se observa el comportamiento en promedio del proceso de filtración en cada filtro en la localización 1.

Figura 26.

Militros obtenidos de cada filtro de localización 2 en tratamiento de filtración



Nota: Se observa el comportamiento el proceso de filtración en cada filtro en la localización 2.

Figura 27.

Militros filtrados en promedio obtenidos de tratamiento de filtración en localización 2

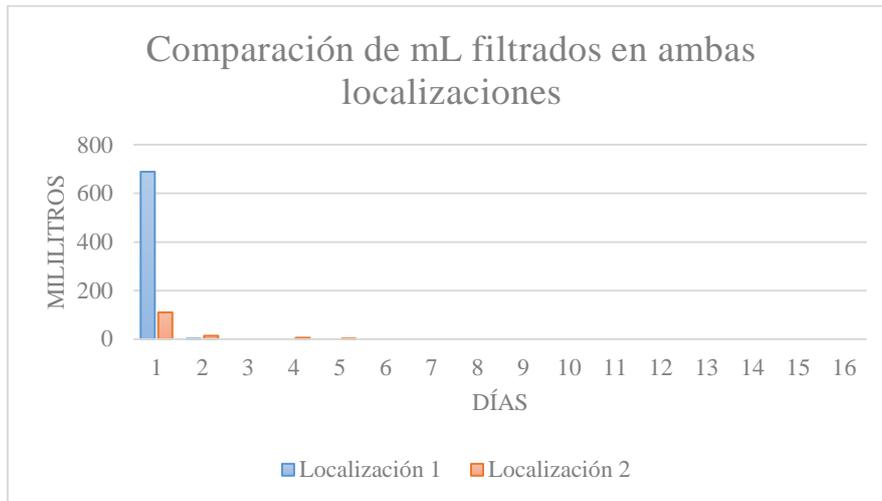


Nota: Se observa el comportamiento en promedio del proceso de filtración en cada filtro en la localización 2.

Se evidenció que las curvas de mililitros filtrados poseen un comportamiento similar entre ellas, es decir que, el agua contenida en el lodo que se colocó sobre los filtros fue liberada en menos de 5 días.

Figura 28.

Comparación de mL filtrados entre ambas localizaciones



Nota: La presente figura indica los mililitros obtenidos en promedio en ambas localizaciones.

Notoriamente en la localización 1 se obtuvo una mayor cantidad de mililitros de agua filtrada a comparación de la localización 2. Los resultados no presentaron un aumento significativo con respecto a la cantidad de mililitros filtrados, esto se debe a que no existió entrada de energía solar debido a la ausencia de factores ambientales (radiación solar y viento) para la evaluación de este tratamiento.

Las tasas de filtración para cada localización se obtuvieron en base a los datos de la **Tabla 20 y 21** que se presentan a continuación:

Tabla 20.*Tasas de filtración ($m^3 / m^2 \times hora$) obtenidas en localización 1*

# Filtro	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12	Día 13	Día 14	Día 15	Día 16
1	0.00295	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.00570	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.00080	0.00001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0.00249	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.00317	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: En la presente tabla se indican las tasas de filtración diaria obtenida en la localización 1.**Tabla 21.***Tasas de filtración ($m^3 / m^2 \times hora$) obtenidas en localización 2*

# Filtro	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12	Día 13	Día 14
6	0.0004	0.0002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0.0002	0	0	0.0001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0.0004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0.0007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.0007	0.0001	0	0	0.0001	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: En la presente tabla se indican las tasas de filtración diaria obtenida en la localización 2.

En base al cálculo de los promedios de las tasas de filtración determinadas previamente para cada localización, se obtuvo valores de $0.00294 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \times \text{hora}}$ y de $0.00037 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \times \text{hora}}$, para la localización 1 y localización 2 respectivamente.

El contenido de sólidos totales, fijos y volátiles se analizó en las muestras líquidas filtradas para cada localización se encuentran a continuación:

Tabla 22.

Contenido de sólidos totales, fijos y volátiles localización 1

Sólidos Totales	Sólidos Fijos	Sólidos Volátiles
107.46	63.49	43.97

Nota: Se observan los valores obtenidos de sólidos totales, fijos y volátiles de la muestra líquida obtenida en la localización 1.

Tabla 23.

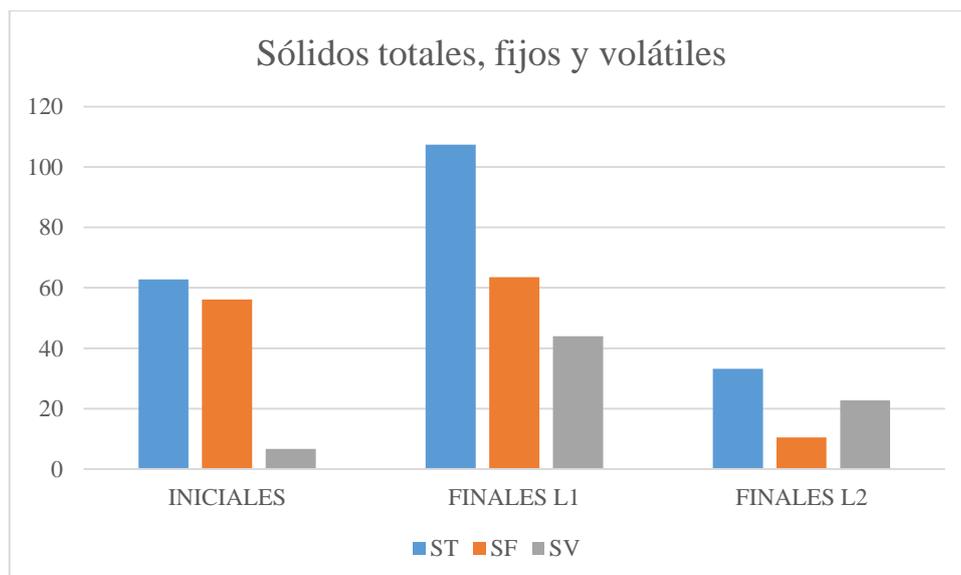
Contenido de sólidos totales, fijos y volátiles localización 2

Sólidos Totales	Sólidos Fijos	Sólidos Volátiles
33.20	10.44	22.76

Nota: Se observan los valores obtenidos de sólidos totales, fijos y volátiles de la muestra líquida obtenida en la localización 2.

Figura 29.

Comparación de resultados iniciales de sólidos totales, fijos y volátiles y post tratamiento para localización 1



Nota: En la presente figura se comparan los valores de sólidos totales, fijos y volátiles iniciales y finales de ambas localizaciones.

Las muestras en las que se analizó el contenido de humedad final fueron obtenidas en la torta que se retuvo sobre el medio filtrante. Los resultados se indican a continuación:

Tabla 24.

Contenido de humedad final localización 1, tratamiento de filtración

# Filtro	% Contenido de humedad final (Día 17)
1	15.12
2	18.48
3	14.49
4	18.37
5	16.29

Nota: La presente tabla indica los valores de contenido de humedad final en la torta retenida por cada filtro en la localización 1.

Tabla 25.

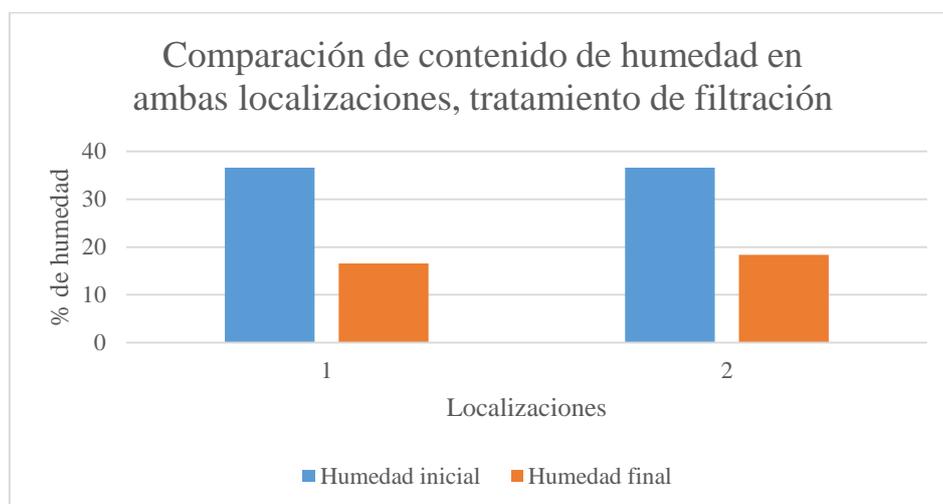
Contenido de humedad final localización 2, tratamiento de filtración

# Filtro	% Contenido de humedad final (Día 14)
6	26.48
7	15.33
8	15.35
9	18.88
10	15.78

Nota: La presente tabla indica los valores de contenido de humedad final en la torta retenida por cada filtro en la localización 2.

Figura 30.

Comparación de resultados obtenidos de contenido de humedad inicial y final en tratamiento de filtración de ambas localizaciones



Nota: La presente tabla indica los valores de contenido de humedad final inicial y final de los lodos post tratamiento de filtración.

Existió un menor porcentaje de contenido de humedad final en la localización 1.

5.2.3. Acondicionamiento químico

Para el análisis de los resultados de este tratamiento se monitoreó las condiciones ambientales diariamente durante 6 días en la localidad 2, obteniéndose una matriz de datos promedio de los valores horarios para cada día, como se puede observar a continuación:

Tabla 26.

Condiciones climáticas obtenidas en localización 2 en el tratamiento de acondicionamiento químico

Día	Temperatura aire (°C)	Velocidad del viento (m/s)	Presión atmosférica (hPa)	Humedad relativa (%)
0	12.60	154.38	739.97	76.83
1	14.41	202.96	738.49	72.83
2	15.02	163.25	738.20	74.88
3	15.17	159.29	737.77	77.67
4	14.48	172.33	737.85	76.88
5	13.98	173.13	738.24	79.33
6	14.03	151.13	739.28	69.33

Nota: Se observan los valores de los parámetros analizados en la estación M0004 para el tratamiento de acondicionamiento químico. Tomado de (INAMHI, 2020).

El acondicionamiento químico de los cajones consiste en la adición de óxido de calcio (cal viva) en diferentes concentraciones respecto al peso del lodo. A continuación, se detallan las concentraciones usadas en este tratamiento:

Tabla 27.

Concentraciones de cal

Cajón	Concentración de cal	Peso de lodo (kg)	Peso de cal (kg)
6	20%	1.90	0.38
7	40%	1.90	0.76
8	60%	1.90	1.14
9	80%	1.90	1.52
10	100%	1.90	1.90

Nota: La presente tabla indica los valores de contenido de cal en cada cajón.

A partir de la medición diaria de la masa de los cajones expresada en kilogramos, se obtuvo la siguiente matriz de datos:

Tabla 28.

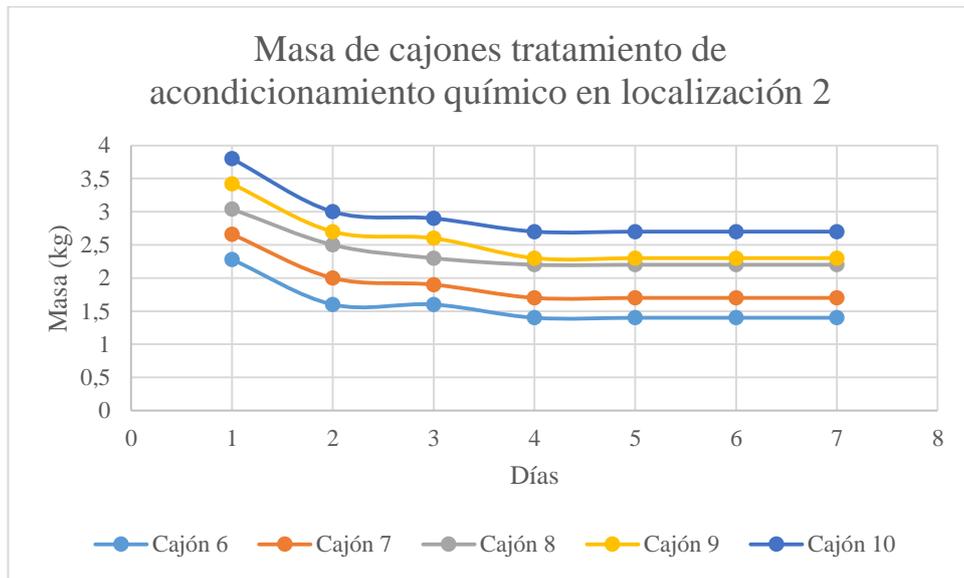
Masas diarias de cajones (kg) en localización 2 en el tratamiento de acondicionamiento químico

# de cajón / Día	Día 0 (kg)	Día 1 (kg)	Día 2 (kg)	Día 3 (kg)	Día 4 (kg)	Día 5 (kg)	Día 6 (kg)
6	2.28	1.60	1.60	1.40	1.40	1.40	1.40
7	2.66	2.00	1.90	1.70	1.70	1.70	1.70
8	3.04	2.50	2.30	2.20	2.20	2.20	2.20
9	3.42	2.70	2.60	2.30	2.30	2.30	2.30
10	3.80	3.00	2.90	2.70	2.70	2.70	2.70
Promedios	3.04	2.36	2.26	2.06	2.06	2.06	2.06

Nota: Se observan los valores de masa (kg) medidos diariamente de cada cajón.

Figura 31.

Masas diarias de cajones (kg) en localización 2 en el tratamiento de acondicionamiento químico

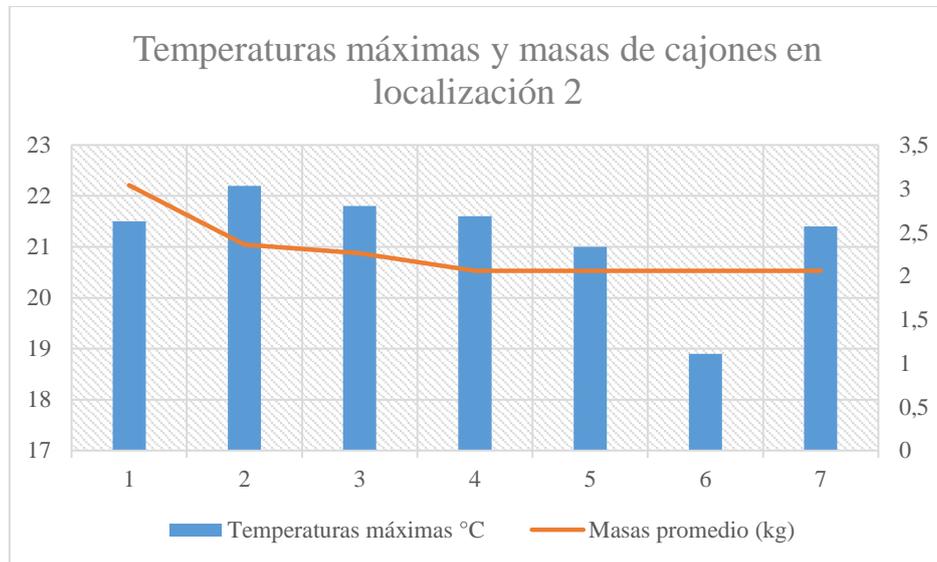


Nota: La presente figura indica el comportamiento diario de las masas de los cajones con diferentes concentraciones de cal.

En base a la gráfica se dedujo que a partir del día 4 el peso de los cajones comenzó a ser constante, y que aproximadamente todos los cajones se redujeron su peso en el mismo porcentaje.

Figura 32.

Masas promedio (kg) y temperaturas máximas (°C) en localización 2 en tratamiento de acondicionamiento químico

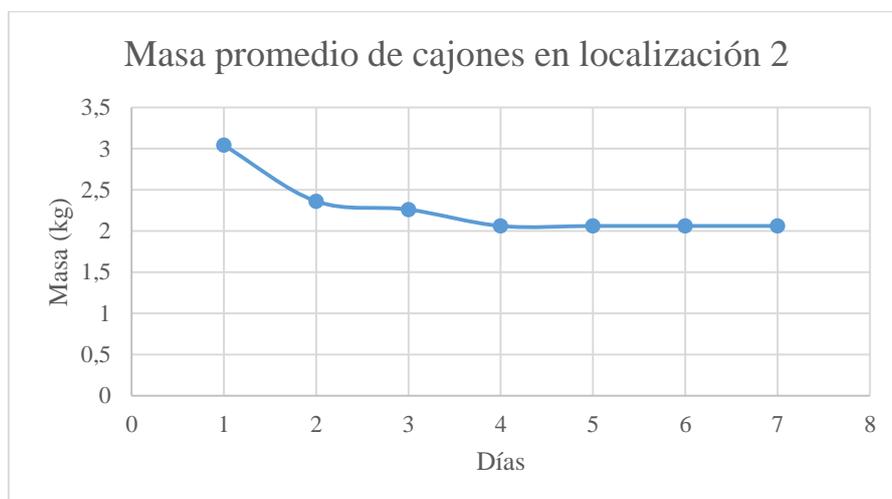


Nota: La presente figura indica el comportamiento del promedio de las masas de los cajones respecto al tiempo con las temperaturas máximas registradas durante el desarrollo del tratamiento de acondicionamiento químico.

El comportamiento de la curva de masa de los cajones con el acondicionamiento químico fue bastante similar a la curva de masa con secado solar en relación a las temperaturas máximas, es decir se evidencia un aumento de pendiente durante los primeros días, lo que significa pérdida de masa durante días de mayor temperatura.

Figura 33.

Masa promedio de cajones en localización 2, con acondicionamiento químico

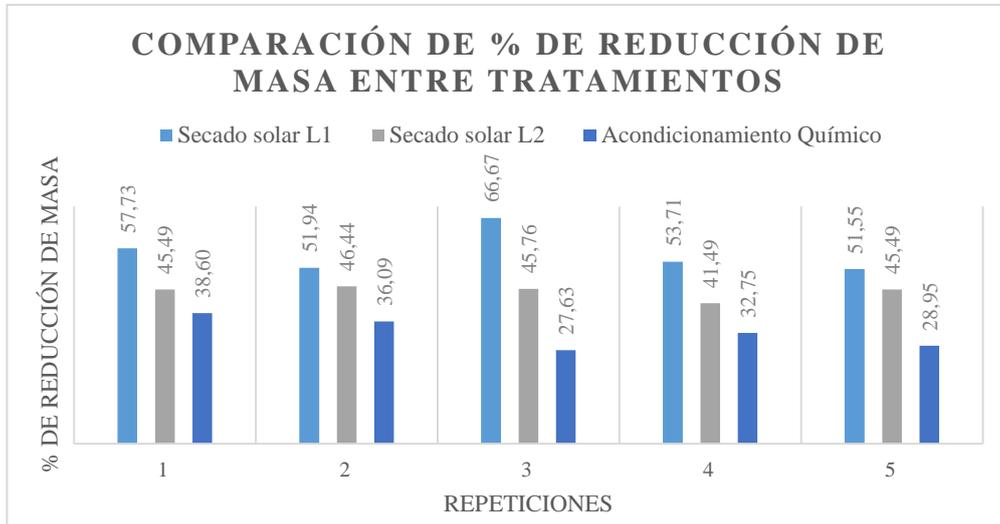


Nota: Se observa el comportamiento del promedio de masas respecto a los días de desarrollo del tratamiento de acondicionamiento químico.

En los primeros 4 días de aplicación del tratamiento, se redujo un 32 % del peso del lodo de forma aproximada.

Figura 34.

Comparación entre masas obtenidas de tratamiento de secado solar y de acondicionamiento químico



Nota: Se observa una comparación de la reducción de masa ocurrida entre los tratamientos de secado solar y acondicionamiento químico.

Como se puede observar en la **Figura 34**, el resultado de la comparación de los distintos tratamientos físicos y químicos aplicados en este trabajo indicó que el tratamiento que redujo en mayor porcentaje la masa de los cajones fue el tratamiento de secado solar en la localización 1.

En base a los datos obtenidos en la **Tabla 28** se obtuvo una matriz de datos con la masa de agua evaporada diariamente en kilogramos:

Tabla 29.

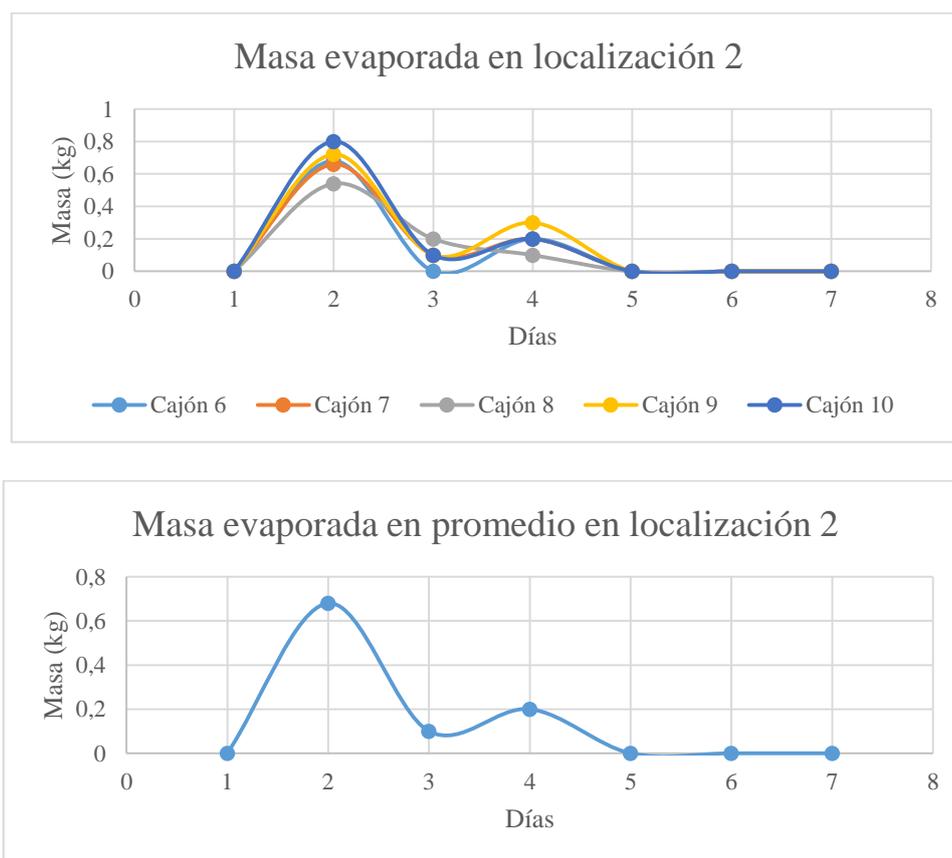
Masa evaporada de cajones con respecto al peso inicial en localización 2 en tratamiento de acondicionamiento químico

# de cajón / Día	Día 0 (kg)	Día 1 (kg)	Día 2 (kg)	Día 3 (kg)	Día 4 (kg)	Día 5 (kg)	Día 6 (kg)
6	0.00	0.68	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.66	0.10	0.20	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.54	0.20	0.10	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.72	0.10	0.30	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.80	0.10	0.20	0.00	0.00	0.00
Promedios	0.00	0.68	0.10	0.20	0.00	0.00	0.00

Nota: La presente tabla indica los valores de masa evaporada de cada cajón.

Figura 35.

Masa evaporada (kg) en promedio y de cada cajón de localización 2 en tratamiento de acondicionamiento químico



Nota: Se observa el comportamiento de la masa evaporada de cada cajón y el promedio de la masa evaporada durante el desarrollo del tratamiento de acondicionamiento químico.

Se observó que el proceso de evaporación se detuvo una vez que la masa de agua evaporada llegó a ser constante con respecto al peso inicial.

Una vez obtenido los valores de masa de agua evaporada en función del tiempo se obtiene la siguiente matriz de datos acerca de la tasa de evaporación en cada cajón para la localización 2:

Tabla 30.

Tasas de evaporación (g/m² x minuto), tratamiento de acondicionamiento químico localización 2

# de cajón / Día	Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6
6	0.00	5.25	0.00	1.54	0.00	0.00	0.00
7	0.00	5.09	0.77	1.54	0.00	0.00	0.00
8	0.00	4.17	1.54	0.77	0.00	0.00	0.00
9	0.00	5.56	0.77	2.31	0.00	0.00	0.00
10	0.00	6.17	0.77	1.54	0.00	0.00	0.00

Nota: La presente tabla indica las tasas de evaporación obtenida diariamente de cada cajón.

Se calculó el promedio de las tasas de evaporación de cada cajón en la localización 2 se obtuvo un valor estimado de $2.52 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \times \text{minuto}}$. Y de manera individual las tasas de evaporación de cada cajón con su concentración de cal respecto al peso son las siguientes:

Tabla 31.

Concentraciones de cal y tasas de evaporación (g/m²x minuto) obtenidas

Cajón	Concentración de cal	Tasa de evaporación
6	20%	2.26
7	40%	2.47
8	60%	2.16
9	80%	2.88
10	100%	2.83

Nota: La presente tabla indica las tasas de evaporación obtenidas de cada cajón al igual que cada concentración de cal usada en los mismos.

Se apreció que las tasas de evaporación que se obtuvieron fueron similares entre sí, sin embargo, un menor peso de cal añadido al lodo representa un menor costo en el tratamiento final para este residuo, por ello el tratamiento químico con los resultados óptimos respecto a la tasa de evaporación y peso de lodo con cal es el cajón 6 con 20 % de concentración de cal.

Finalmente, el contenido de humedad final de las muestras de lodo seco se reporta a continuación:

Tabla 32.

Contenido de humedad final en localización 2 del tratamiento de acondicionamiento químico

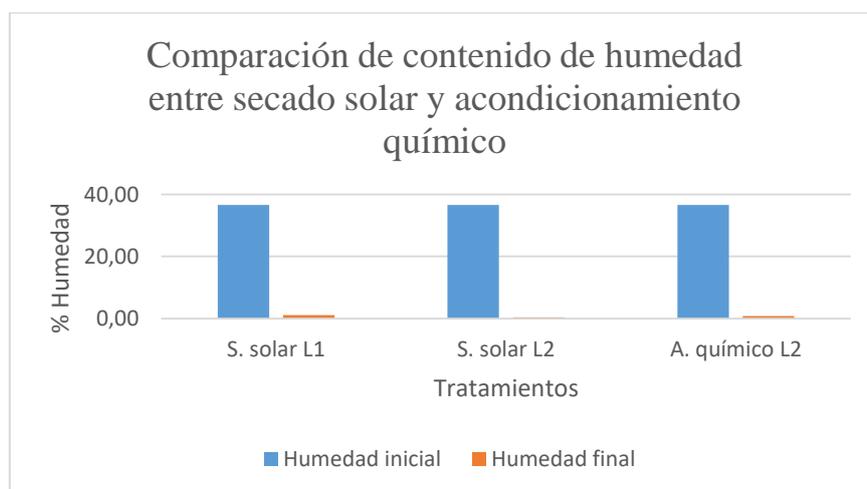
# Cajón	% Contenido de humedad final (Día 7)
6	0.62
7	0.64
8	0.86
9	1.11
10	0.61

Nota: Se indica el contenido de humedad final obtenido en cada cajón usado en el tratamiento químico.

Se pudo observar que el cajón N° 6 y el cajón N° 10 obtuvieron los menores porcentajes de contenido de humedad final, sin embargo, la dosis utilizada de cal difiere bastante ya que se utilizó 20 % y 100 % respectivamente en cada cajón, por consiguiente, al usar una concentración mayor el peso del residuo final aumenta, lo cual haría que el costo del tratamiento final también aumente.

Figura 36.

Comparación de contenido de humedad inicial con resultados obtenidos de contenido de humedad final en el tratamiento de secado solar y tratamiento de acondicionamiento químico



Nota: La presente figura detalla la comparación de contenido de humedad final e inicial de los tratamientos de secado solar y acondicionamiento químico.

Se dedujo en base a la gráfica que el tratamiento de secado solar en la localización 2 y el acondicionamiento químico poseen porcentajes de contenido de humedad final semejantes.

5.2.4. Análisis estadístico de resultados

Este análisis fue realizado con el objetivo de evaluar los distintos tratamientos aplicados al lodo de la PTAR en función de su contenido de humedad final, es decir, la reducción de este parámetro con respecto a su valor inicial (36.59 %), sin embargo, los tratamientos físicos analizados fueron desarrollados en localizaciones diferentes, de manera que primero se determinó la influencia de la variable “localización” con el propósito de esclarecer la varianza producida por la misma sobre los resultados del contenido de humedad y precisar si los tratamientos son comparables. Cabe mencionar que los resultados de contenido de humedad final siguieron una distribución normal.

5.2.4.1. ANOVA de dos factores con varias muestras por grupo. Debido a que se realizaron ensayos en 2 localizaciones diferentes para el tratamiento de secado solar y filtración, con 5 repeticiones cada una, se determinó mediante un ANOVA de dos factores la influencia de las localizaciones y de los tratamientos sobre el % de contenido de humedad final en las muestras analizadas. Este análisis estadístico fue realizado en Excel usando un intervalo de confianza del 95 %.

Tabla 33.

Resumen de tratamientos VS localización

RESUMEN	Localización 1	Localización 2	Total
1 Filtros			
Cuenta	5	5	10
Suma	82.76	91.82	174.58
Promedio	16.55	18.36	17.46
Varianza	3.35	22.75	12.51
2 Secado solar			
Cuenta	5	5	10
Suma	6.28	1.71	7.99
Promedio	1.26	0.34	0.80
Varianza	0.16	0.03	0.31
Total			
Cuenta	10	10	
Suma	89.03	93.54	
Promedio	8.90	9.35	
Varianza	66.55	100.34	

Nota: La presente tabla indica los valores de suma, promedio y varianza entre los factores de localización y tratamientos.

Tabla 34.*Resultados de análisis de varianza de dos factores*

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tratamientos	1387.59	1	1387.59	211.20	1.2E-10	4.49
Localizaciones	1.01	1	1.01	0.15	7.0E-01	4.49
Interacción	9.29	1	9.29	1.41	2.5E-01	4.49
Dentro del grupo	105.12	16	6.57			
Total	1503.02	19				

Nota: La presente tabla indica el resultado de análisis de varianza de dos factores, Tomado de Excel 2016.

5.2.4.1.1. Tratamientos. Se toma como hipótesis nula que los valores de contenido de humedad no tienen diferencias entre sí a causa de los tratamientos, y como hipótesis alternativa que si existe una diferencia entre los valores de contenido de humedad a causa de los tratamientos.

Como primera prueba estadística se tiene que el valor de F (211.20) es mayor al valor crítico para F (4.49) de los tratamientos en la **Tabla 34**. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, lo que significa que si existe una diferencia entre los valores de contenido de humedad debido a la influencia de los tratamientos.

Finalmente, el valor de probabilidad obtenido para los tratamientos (1.23×10^{-10}) es inferior a 0.005 lo que indica que se debe rechazar la hipótesis nula, corroborando que si existe una diferencia entre los tratamientos.

5.2.4.1.2. Localizaciones. Se toma como hipótesis nula que los valores de contenido de humedad no tienen diferencias entre sí a causa de las localizaciones donde se realizaron los ensayos, y como hipótesis alternativa que si existe una diferencia entre los valores de contenido de humedad a causa de las localizaciones.

Como primera prueba estadística se tiene que el valor de F (0.15) es menor al valor crítico para F (4.49) de las localizaciones en la **Tabla 34**. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, lo que significa que no existe una diferencia entre los valores de contenido de humedad debido a la influencia de las localizaciones.

Finalmente, el valor de probabilidad obtenido para las localizaciones (0.7) es superior a 0.005 lo que indica que se debe aceptar la hipótesis nula, corroborando que no existe una diferencia entre las localizaciones.

5.2.4.1.3 Interacción entre ambos factores. Se toma como hipótesis nula que los valores de contenido de humedad no tienen diferencias entre sí a causa de los tratamientos y de las localizaciones, y como hipótesis alternativa que si existe una diferencia entre los valores de contenido de humedad a causa de los tratamientos y de las localizaciones.

Como primera prueba estadística se tiene que el valor de F (1.41) es menor al valor crítico para F (4.49) de los tratamientos en la **Tabla 34**. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, lo que significa que estadísticamente no existe diferencia entre los valores de contenido de humedad debido a la influencia de los tratamientos y las localizaciones.

Finalmente, el valor de probabilidad obtenido para la interacción entre ambos factores (0.25) es superior a 0.005 lo que indica que se debe aceptar la hipótesis nula, corroborando que estadísticamente no existe diferencia entre los valores del contenido de humedad final a causa de la interacción al mismo tiempo de ambos factores los cuales son las localizaciones y los tratamientos.

5.2.4.2. ANOVA de todos los tratamientos y test de Tukey. Al demostrarse que no existen estadísticamente diferencias significativas en el porcentaje de contenido de humedad entre las localizaciones, se procedió a analizar todos los tratamientos con el fin de establecer estadísticamente el tratamiento que presente los mejores resultados.

Este análisis de varianza se realizó en el programa Rstudio, con la finalidad de evaluar la variabilidad entre los resultados de contenido de humedad obtenidos en cada tratamiento, usando un intervalo de confianza del 95 %.

La hipótesis nula en este caso fue que los tratamientos no influyen en el resultado del contenido de humedad final, y como hipótesis alternativa se tomó que si existen diferencias entre los resultados a causa de los tratamientos.

Tabla 35.

Abreviaciones usadas en el Análisis estadístico en Rstudio

<i>Siglas</i>	<i>Significado</i>
SSL1	Secado solar en localización 1
SSL2	Secado solar en localización 2
FL1	Filtración en localización 1
FL2	Filtración en localización 2
AQ	Acondicionamiento químico

Nota: La presente tabla indica las siglas que fueron usadas en la matriz de datos incorporada en el script del Rstudio.

Figura 37.

Resultados obtenidos ANOVA en Rstudio del contenido de humedad final

```
> summary(anova1)
              Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
Tratamiento   4 1675.5   418.9    79.45 5.51e-12 ***
Residuals    20  105.4     5.3
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

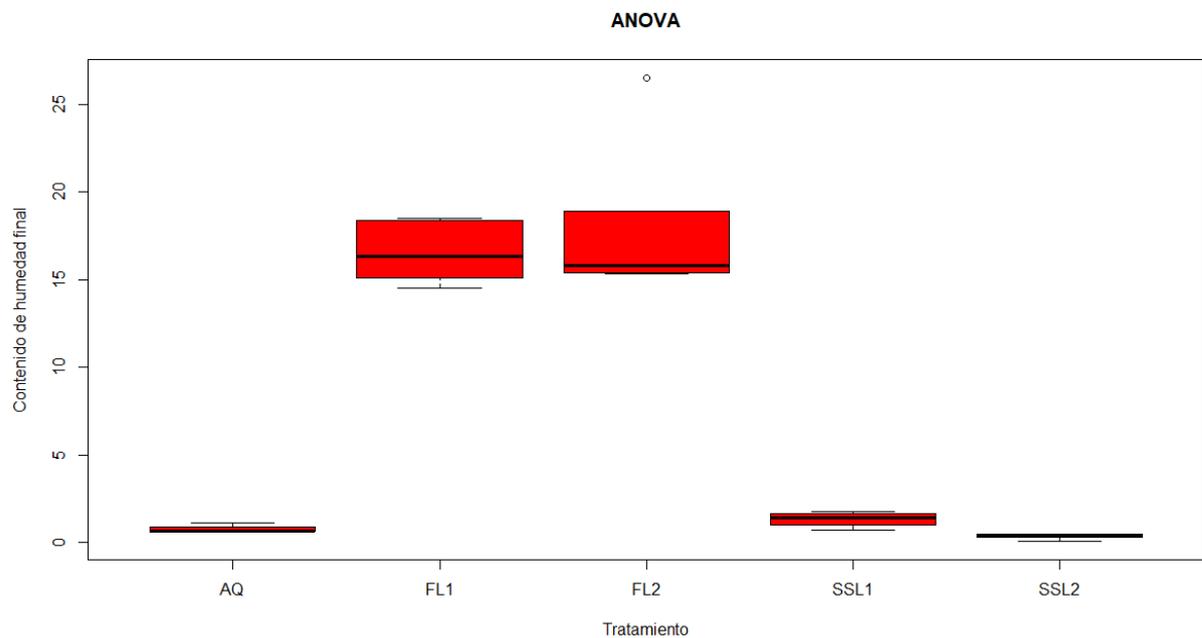
Nota: La presente figura indica los resultados del ANOVA realizado en Rstudio entre los tratamientos en función del contenido de humedad fina. Tomado de Rstudio.

El valor que se obtuvo como probabilidad (5.5×10^{-12}) indicó que existe una diferencia muy significativa entre los resultados de contenido de humedad final y los tratamientos aplicados.

Se realizó un diagrama de caja con la finalidad de poder visualizar la distribución de los datos en función de los cuartiles.

Figura 38.

Diagrama de caja de contenido de humedad final de cada tratamiento



Nota: La figura indica el diagrama de caja realizado a partir de los resultados de porcentaje de contenido de humedad final. Tomado de Rstudio.

Tal como lo indicó el ANOVA realizado previamente, se puede observar en la **Figura 36** que sí existen diferencias entre los tratamientos, pero para determinarlas estadísticamente se procedió a realizar una prueba de Tukey, con los siguientes resultados:

Figura 39.

Resultados de la prueba de Tukey

```

> TukeyHSD(anova1)
  Tukey multiple comparisons of means
    95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = `Contenido de humedad final` ~ Tratamiento)

$Tratamiento
      diff      lwr      upr    p adj
FL1-AQ  15.7845203  11.439153  20.129887 0.0000000
FL2-AQ  17.5978192  13.252452  21.943186 0.0000000
SSL1-AQ   0.5223781  -3.822989   4.867745 0.9961159
SSL2-AQ  -0.4238752  -4.769242   3.921492 0.9982746
FL2-FL1   1.8132989  -2.532068   6.158666 0.7239345
SSL1-FL1 -15.2621421 -19.607509 -10.916775 0.0000000
SSL2-FL1 -16.2083954 -20.553762 -11.863028 0.0000000
SSL1-FL2 -17.0754410 -21.420808 -12.730074 0.0000000
SSL2-FL2 -18.0216943 -22.367061 -13.676327 0.0000000
SSL2-SSL1 -0.9462533  -5.291620   3.399114 0.9643287
  
```

Nota: La presente figura indica los resultados obtenidos de la prueba de Tukey entre los tratamientos aplicados en la investigación en base a los resultados de porcentaje de contenido de humedad final obtenido. Tomado de Rstudio.

Tabla 36.

Resultados de análisis de rangos en Infostat a partir de una prueba Tukey

Test: Tukey					
Alfa=0,05 DMS=4,28086					
Error: 5,1165					
gl: 20					
N°	Tratamientos	Medias	n	E.E.	
1	SSL2	0,34	5	1,01	A
2	AQ	0,77	5	1,01	A
3	SSL1	1,29	5	1,01	A
4	FL1	16,55	5	1,01	B
5	FL2	18,32	5	1,01	B

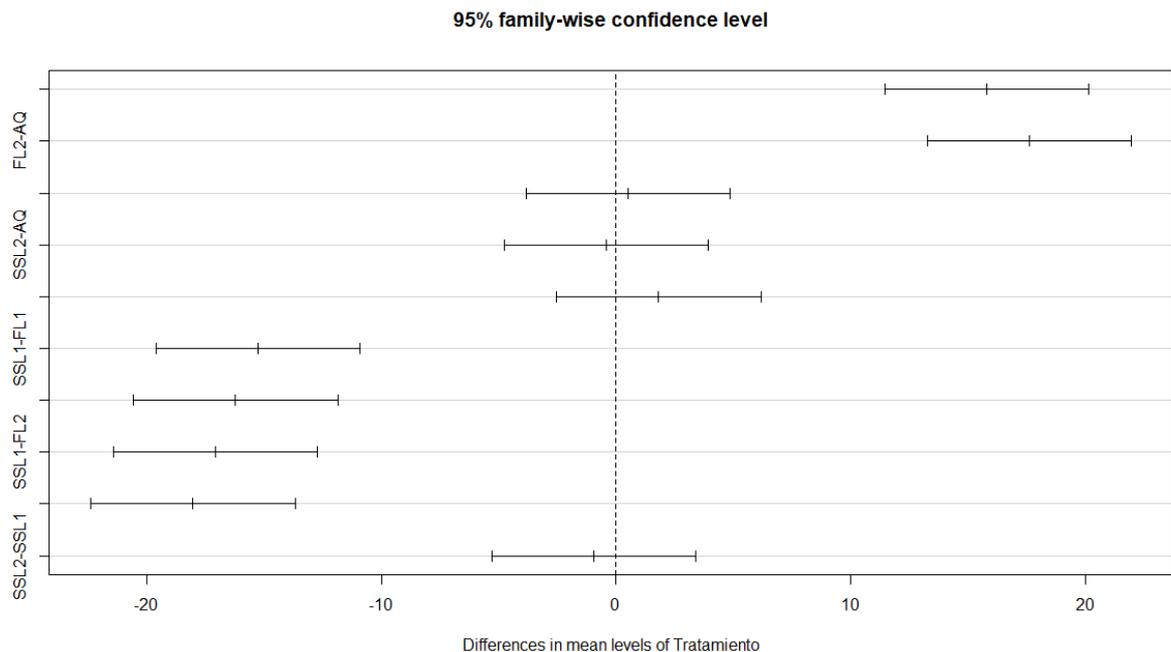
Nota: La presente tabla describe que medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$), por lo tanto entre los 5 tratamientos, 3 describen mejores resultados. Tomado de Infostat.

El valor de p ajustado indica que tan parecidos son los tratamientos entre sí, es decir, mientras más cerca de 1 sea este se afirma que existe un gran parecido entre ambos tratamientos, entonces se determinó que entre el secado solar en la localización 1, secado solar en la localización 2 y el tratamiento de acondicionamiento químico existe un gran parecido, debido a que en ambos casos se produce el proceso de evaporación.

Para determinar la pareja que tenga una mayor similitud se procedió a graficar los resultados de la prueba de Tukey.

Figura 40.

Gráfica de la prueba de Tukey



Nota: La presente gráfica indica las diferencias entre las medias de cada tratamiento aplicado en los lodos. Tomado de Rstudio.

Se observó que el tratamiento de secado solar en la localización 2 así como el tratamiento de acondicionamiento químico son muy parecidos entre sí, por ello se observó las medias de estos tratamientos para determinar aquel que presente un menor contenido de humedad final.

Tabla 37.

Contenido de humedad final de tratamiento de secado solar y acondicionamiento químico

Cajón	% Contenido de humedad final	
	SSL	AQ
1	1.00	
2	0.70	
3	1.63	
4	1.38	
5	1.74	
6	0.43	0.62
7	0.28	0.64
8	0.09	0.86
9	0.44	1.11
10	0.47	0.61
Promedio	0.82	0.77

Nota: La presente tabla indica los valores obtenidos de contenido de humedad final obtenidos en ambas localizaciones del tratamiento de secado solar y del tratamiento de acondicionamiento químico.

En base a los resultados obtenidos en el ANOVA de 2 factores realizados en los tratamientos donde hubo 2 localizaciones, el cual indicó que no existe diferencia entre los resultados del contenido de humedad a causa de las localizaciones, y debido a que un menor contenido de humedad final indica que existió una mayor remoción de esta variable, se determinó que el mejor tratamiento para reducir la humedad es acondicionamiento químico con cal viva en concentración del 20% respecto al peso del lodo, puesto que en esta concentración se determinó una tasa de evaporación aceptable sin que se incremente demasiado el peso del cajón.

No obstante, se determinó también que el tratamiento que redujo en mayor porcentaje su peso fue el tratamiento de secado solar en la localización 1, ver **Figura 34**, lo cual también influyó en la determinación de un tratamiento que genere ahorros para la empresa, mejorando el sistema de gestión ambiental de la misma.

5.2.5. Dimensionamiento

5.2.5.1. Tratamiento de acondicionamiento químico. En base al dimensionamiento de los cajones, donde se llevó a cabo el desarrollo del tratamiento de acondicionamiento químico, se proyectó la creación de estructuras metálicas con cajones, donde el lodo con cal incorporada será colocado. Al transcurrir al menos 30 días el lodo seco será retirado de los cajones y será almacenado en recipientes adecuados hasta que el gestor ambiental los retire.

$$\text{Volumen de los cajones usados experimentalmente} = \text{lado} \times \text{lado} \times \text{lado} \quad (12)$$

$$\text{Volumen de los cajones usados experimentalmente} = 0.30 \text{ m} \times 0.30 \text{ m} \times 0.06 \text{ m} = 0.0054 \text{ m}^3$$

Se calculó el peso mensual de lodo que se generará usando este tratamiento, de la siguiente forma:

$$1500 \frac{\text{kg de lodo}}{\text{mes}} * 20\% = 300 \frac{\text{kg de cal}}{\text{mes}}$$
$$1500 \text{ kg de lodo} + 300 \text{ kg de cal} = 1800 \frac{\text{kg}}{\text{mes}}$$

El cajón donde se utilizó el 20 % de concentración de cal pesó 2.28 kg, por lo tanto, mediante una relación simple, se obtuvo el volumen aproximado de lodo a extraerse mensualmente de la PTAR incluyendo la cal.

$$\frac{0.0054 \text{ m}^3}{2.28 \text{ kg}} \times 1800 \text{ kg} = 4.26 \text{ m}^3$$

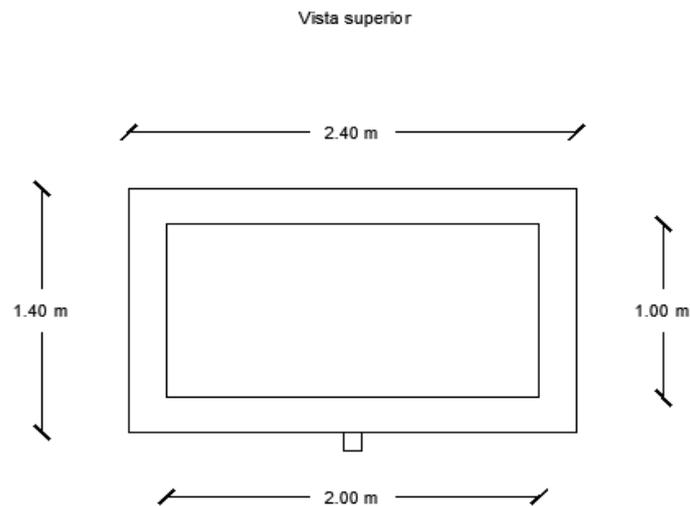
Se empleó la misma forma de los cajones que se utilizaron experimentalmente y se determinó el volumen de los cajones a escala real, finalmente se pudo obtener el siguiente dimensionamiento:

$$\text{Volumen de cajón} = 2 \text{ m (largo)} \times 1 \text{ m (ancho)} \times 0.20 \text{ m (alto)} = 0.4 \frac{\text{m}^3}{\text{cajón}}$$

$$\frac{4.26 \text{ m}^3}{0.4 \frac{\text{m}^3}{\text{cajón}}} = 10.65 \approx 11 + 1(\text{seguridad}) = 12 \text{ cajones}$$

Figura 41.

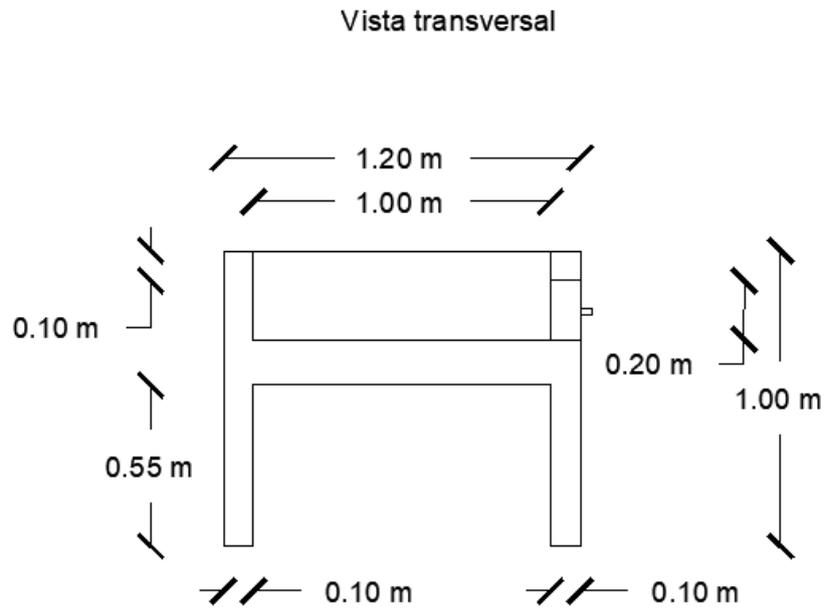
Vista superior cajones de acondicionamiento químico



Nota: La presente figura indica la vista superior de las estructuras metálicas diseñadas donde estarán sustentados los cajones que contendrán los lodos. Tomado de AutoCAD.

Figura 42.

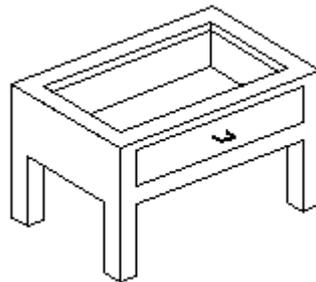
Vista lateral cajones de acondicionamiento químico



Nota: La presente figura indica la vista transversal de las estructuras metálicas diseñadas donde estarán sustentados los cajones que contendrán los lodos. Tomado de AutoCAD.

Figura 43.

Vista en perspectiva de cajones para acondicionamiento químico



Nota: La presente figura indica la vista en perspectiva de las estructuras metálicas diseñadas donde estarán sustentados los cajones que contendrán los lodos. Tomado de AutoCAD.

5.2.5.2. Tratamiento de secado solar. El dimensionamiento de este tratamiento se realizó bajo la misma metodología empleada en el acondicionamiento químico.

Se obtuvo el volumen aproximado de lodo a extraerse mensualmente de la PTAR, mediante una relación simple, donde el peso que contuvieron en promedio los cajones de la localización

1, fue de 1.73 kg:

$$\frac{0.0054 \text{ m}^3}{1.73 \text{ kg}} \times 1500 \text{ kg} = 4.68 \text{ m}^3$$

Se mantuvo el mismo volumen de los cajones diseñados para el tratamiento previo, con esto se logró cuantificar el número de estructuras a construir:

$$\frac{4.68 \text{ m}^3}{0.4 \frac{\text{m}^3}{\text{cajón}}} = 11.7 \approx 12 + 1(\text{seguridad}) = 13 \text{ cajones}$$

5.2.6. Estudio de sostenibilidad económico, técnico y social

Previamente se mencionó que la producción de lodo mensual es de 1500 kg, con ello se hizo el respectivo cálculo para determinar la cantidad de cal a utilizarse:

$$1500 \frac{\text{kg de lodo}}{\text{mes}} * 20\% = 300 \frac{\text{kg de cal}}{\text{mes}}$$

El costo de la cal viva actualmente se encuentra en 0.30 USD/kg (sin IVA), ver **Anexo 16**, se realizó el respectivo cálculo para determinar el costo de la cal:

$$300 \frac{\text{kg de cal}}{\text{mes}} * 0.30 \frac{\text{USD}}{\text{kg}} = 90 \frac{\text{USD}}{\text{mes}}$$

El costo mensual que el gestor ambiental autorizado cobra a la empresa por el tratamiento final de los lodos es de $0.60 \frac{\text{USD}}{\text{kg}}$ y 100 USD por el transporte.

$$1500 \frac{\text{kg de lodo}}{\text{mes}} * 0.60 \frac{\text{USD}}{\text{kg de lodo}} = 900 + 100 = 1000 \frac{\text{USD}}{\text{mes}}$$

El cajón donde se usó el 20 % de cal presentó una reducción de su masa del 38.6 %, por lo tanto, la masa que será enviada al gestor ambiental se cuantificó de la siguiente forma:

$$1800 \frac{kg}{mes} \times (100 \% - 38.6 \%) = 1105.2 \frac{kg}{mes}$$

A continuación se determinó el costo del tratamiento de este residuo:

$$1105.2 \frac{kg \text{ de residuo}}{mes} * 0.60 \frac{USD}{kg \text{ de lodo}} = 663.12 \frac{USD}{mes}$$

$$663.12 \frac{USD}{mes} + 90 \frac{USD}{mes} (\text{costo de la cal}) + 100 USD (\text{transporte}) = 853.12 \frac{USD}{mes}$$

Se generaría un ahorro anual de 1762.56 USD.

Sin embargo, mediante la utilización del tratamiento de secado solar, el cual presentó la mayor reducción de masa (56.32 % en promedio), se obtendrán los siguientes valores:

$$1500 \frac{kg}{mes} \times (100 \% - 56.32 \%) = 655.2 \frac{kg}{mes}$$

A continuación, se determinó el costo del tratamiento de este residuo:

$$655.2 \frac{kg \text{ de residuo}}{mes} * 0.60 \frac{USD}{kg \text{ de lodo}} = 393.12 \frac{USD}{mes}$$

$$393.12 \frac{USD}{mes} + 100 USD (\text{transporte}) = 493.12 \frac{USD}{mes}$$

Se generaría un ahorro anual de 6082.56 USD.

5.2.7. Análisis de costo de construcción, operación y mantenimiento

5.2.7.1. Construcción

Tabla 38.

Análisis de costos de construcción

<i>Material</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Costo unitario</i>	<i>Total</i>
Cajones	12	60	720 USD
Plástico de polietileno de alta densidad	10 (m ²)	1	10 USD
Total			730 USD

Nota: Se indican los elementos que generarán costos en la construcción de los cajones.

5.2.7.2. Operación

Tabla 39.

Análisis de costos de operación

<i>Material</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Costo unitario</i>	<i>Total</i>
Cal	300 (kg)	0.3	90 USD
Total			90 USD

Nota: Se indican los elementos que generarán costos en la operación de los cajones.

5.2.7.3. Mantenimiento

Tabla 40.

Análisis de costos de mantenimiento

<i>Material</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Costo unitario</i>	<i>Total</i>
Cerrajero	1	20	20 USD
Plástico de polietileno de alta densidad	5 (m ²)	1	5 USD
Total			25 USD

Nota: Se indican los elementos que generarán costos en el mantenimiento de los cajones.

5.3. Discusiones

- Dentro del tratamiento de secado solar, se evidenció un decrecimiento considerable de las masas en promedio entre los primeros 7 días aproximadamente en ambas localizaciones, tal como muestran las *Figuras 16* y *17*. El proceso de evaporación depende de una serie de factores climáticos para favorecer su mecanismo, tales como humedad relativa del aire, velocidad del viento, radiación solar, temperatura ambiental, entre otros, con lo cual, al existir una diferencia aproximada de 2 °C entre las localizaciones, siendo la localización 1 la de mayor temperatura ambiental promedio, y que en la localización 2 existió un mayor promedio de velocidad de viento, más de 100 veces superior al de la localización 1, se observó que la curva de masas en la localización 1 presentó una pendiente más pronunciada y casi lineal en su mayoría, frente a la curva de la localización 2 como se puede observar en las *Figuras 14* y *15*.
- En la *Figura 18* se muestra un resumen de las masas promedio en las localizaciones 1 y 2, se concreta que la reducción se da de forma uniforme entre las localidades, cumpliendo con el mismo modelo de tendencia. Fue debido a los imprevistos surgidos a causa de la pandemia de COVID 19 que existió una diferencia, de menos de 1 kg, de masa de lodo colocada en los cajones del tratamiento de secado solar entre las dos localizaciones, lo que provocó que en la localización 1 las masas sean menores que en la localización 2.

- Se atribuyó a las diferencias climáticas presentadas entre ambas localizaciones como la principal causa de los diferentes comportamientos encontrados en las tasas de evaporación de cada localización, así mismo los resultados tras comparar el contenido de humedad durante el tratamiento de secado solar reflejados en la **Figura 22**, evidenciaron que el porcentaje de contenido de humedad en la localización 2 resultó menor con respecto al de la localización 1, luego de haber transcurrido un número menor de días para el tratamiento de secado solar en la localización 2 y a pesar de evidenciar temperaturas menores con respecto a la localización 1, se logró obtener 1,29 % de contenido de humedad promedio en 16 días y 0,342 % de contenido de humedad promedio en 13 días, para la localización 1 y 2 respectivamente, a partir de los resultados reflejados en las **Tablas 15** y **16**, esto se atribuyó a que el proceso de evaporación fue optimizado por la difusión ocurrida en esta localización, siendo la de menor temperatura, puesto que la velocidad del viento presentó valores muy superiores frente a la localización de mayor temperatura ambiente.

- El contenido de humedad obtenido en el tratamiento de filtración en ambos sectores reflejó para la localización 1 el valor de 16,55 % de contenido de humedad y para la localización 2 de 18,36 % en contenido de humedad, debido a que el sistema de filtración diseñado se encontró aislado de factores ambientales externos como la luz solar y el viento con la finalidad de evaluar netamente el proceso de filtración como mecanismo para reducir el contenido de humedad final. En el artículo *Dewatering of oily slurry using drying bed with geotextile filter*, Cammarota *et al.* (2008), mencionan que la capacidad de drenaje está relacionada con la permeabilidad del lodo y no se ve influenciado por el tipo de filtro a utilizar, sin embargo aclaran que entre filtros de geotextil y arena resulta más factible utilizar el filtro de geotextil debido a que es más fácil de manejar, finalmente los autores mencionan que el uso de este tipo de filtro permite la obtención de líquido con un nivel de contaminación tal que requiere usar otros tipos de tratamientos convencionales con el fin de obtener lodos deshidratados como fuente de energía, por lo tanto en el presente estudio los resultados que arrojó el tratamiento de filtración con geotextil y arena para ambas localizaciones requiere de otros tratamientos para completar con el proceso de deshidratación, pues el porcentaje de contenido de humedad removido no representa una mejora para el sistema de manejo y transporte de este residuo, ya que la apariencia de este, luego del tratamiento aún mantuvo una consistencia pastosa.

- En la **Figura 30** se pudo comparar el % de contenido de humedad final obtenido en ambas localizaciones dentro del tratamiento de filtración, donde se apreció que en la localización 1 se alcanzó un porcentaje menor, esto se debió a que el tiempo de experimentación para la localización 1 fue mayor (16 días) con respecto a la localización 2 (13 días), esto indica que existió un proceso de evaporación dentro de los filtros con lo cual también se favoreció el proceso de remoción de contenido de humedad final.
- Al comparar las **Figuras 20 y 35**, en las cuales se registró las curvas de masa evaporada tanto del tratamiento de secado solar como de acondicionamiento químico en la localización 2, se apreció que existió una mayor masa evaporada en el acondicionamiento químico puesto que al haber incluido óxido de calcio ocurrió una reacción exotérmica que liberó energía suficiente para favorecer el proceso de evaporación (Vilca, 2019).

- En base a los resultados de la prueba de Tukey descritos en la **Figura 38**, los tratamientos que arrojan mayor similitud son secado solar y acondicionamiento químico realizados en la localidad 2, con un porcentaje de similitud de 99,83 % entre ellos, por tanto al comparar los resultados que se observan en la **Tabla 37**, el cajón que menor contenido de humedad mostró fue el cajón N° 8 para el secado solar y el cajón N° 10 para el acondicionamiento químico, bajo estos resultados, se aceptó como mejor tratamiento a la concentración de 20 % de cal viva agregada al lodo dado que a esta concentración se presentó valores de tasa de evaporación y de contenido de humedad aceptables, para la selección del mejor tratamiento se tomó en cuenta el peso resultante del cajón tras agregar la cal viva para su posterior disposición final. En el estudio realizado por Torres *et al.* (2005) la remoción de humedad alcanzó una reducción de hasta 52 % en un periodo de 30 días, mientras que en el presente estudio se alcanzó una reducción del 98 % de humedad en 7 días, debido a la diferencia en la naturaleza de los lodos, bibliográficamente la remoción de humedad en un periodo de 12 a 16 días es suficiente para deshidratar la muestra, en la misma investigación Torres *et al.* (2005) menciona que una dosis del 20 % en peso de cal es suficiente para garantizar la elevación del pH, esta observación resulta ventajosa al trabajo de investigación pues el pH del lodo de estudio es de 5.80, lo cual contribuye no solo al proceso de deshidratación sino además como un proceso de estabilización del lodo mencionado.

- El análisis estadístico determinó que el tratamiento que más redujo el contenido de humedad del lodo de la PTAR fue el acondicionamiento químico, sin embargo, en la **Figura 34** se pudo observar que el tratamiento de secado solar en la localización 1 se posicionó como el tratamiento que logró reducir en mayor porcentaje su masa. Aparentemente se puede afirmar que una mayor reducción del contenido de humedad del lodo no está ligada a una mayor reducción de su masa, pero al tomar en cuenta el promedio de contenido de humedad final del secado solar en ambas localizaciones, ya que el resultado del análisis de varianza de dos factores realizado sobre los valores obtenidos de contenido de humedad final para los tratamientos de secado solar y filtración determinó que estadísticamente no existe diferencias significativas a causa de las localizaciones, se determinó 0.82 % de contenido de humedad final en las muestras y el promedio obtenido en el tratamiento de acondicionamiento químico fue de 0.77 %, lo cual indica que el contenido de humedad final de ambos tratamientos no posee una amplia diferencia entre ellos, no obstante, el tratamiento de acondicionamiento químico redujo en promedio 32.8 % de su masa mientras que el secado solar en la localización 1 se redujo en promedio un 56.32 %, esto reveló que dentro de la presente investigación la disminución de la masa de lodo implicó una reducción significativa del contenido de humedad, pero la reducción del contenido de humedad no reflejó una disminución significativa de masa necesariamente.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Se utilizaron análisis de varianza y prueba de Tukey para evaluar y comparar los resultados obtenidos de contenido de humedad final de cada tratamiento, se encontró un 99.83 % de semejanza entre el secado solar de la localización 2 y el acondicionamiento químico y se determinó que el mejor tratamiento en cuanto a la reducción de contenido de humedad fue el acondicionamiento químico ya que este posee una media inferior al del secado solar, en cuanto a la concentración usada, se seleccionó el 20 % de cal con respecto al peso del lodo, el cual obtuvo 0.62 % de humedad final.
- Los valores determinados con respecto a la caracterización de lodos fueron: 36, 59 % de humedad inicial, 6,71 mg/L de sólidos volátiles totales, 56.12 mg/L de sólidos fijos totales, 62.83 mg/L de sólidos totales, con respecto a la prueba estándar para agua y sedimentos (BSW) se obtuvo 38.9 % de volumen de sedimentos, 52.5 % de volumen acuoso y 8.8 % volumen hidrocarburo, la viscosidad del lodo con 1,16 cSt y gravedad API 13,77 °API.
- Se realizó el estudio de sostenibilidad económico, técnico y social tanto de la aplicación del acondicionamiento químico, dado que fue el tratamiento que redujo más el contenido de humedad, donde se determinó un ahorro anual de 1762.56 dólares para la empresa entorno a los gastos que involucra el gestor ambiental y transporte del lodo para su disposición final, así como de la aplicación del secado solar, ya que fue el tratamiento que redujo en mayor porcentaje su masa, donde se determinó un ahorro anual de 6082.56 dólares.

- Se diseñó para el manejo del lodo con 20 % de cal con respecto al peso de lodo, 12 unidades de dimensiones 2 m (largo) x 1 m (ancho) x 0.2 m (alto), sustentadas en estructuras metálicas, con cajones expuestos al ambiente, ubicadas bajo cubierta y debidamente ventiladas.

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar un análisis CRETIB a las muestras post tratamientos, con la finalidad de evaluar si persiste el comportamiento inflamable del lodo, por ende su peligrosidad.
- Se recomienda determinar la composición exacta de los lodos, así como su poder calorífico, con el objetivo de analizar la posibilidad de usar este residuo como potencial fuente energética.
- Se recomienda realizar un post-tratamiento de secado solar a partir del proceso de filtración para incrementar la reducción del contenido de humedad.
- Para la aplicación de cal a futuro se recomienda implementar extractores de olor, puesto que la reacción tras la colocación de cal en el lodo produce olores fuertes diferentes a los del lodo original.

7. BIBLIOGRAFÍA

Biblioteca Nacional de Medicina de EE.UU. (5 de abril de 2020). Obtenido de Pubchem:

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Fenoprop>

Valencia Bonilla, N. T. (2008). *Secado solar de lodos*. Morelos: Universidad Nacional Autónoma de México.

Alonso, D. (24 de Enero de 2012). *SCRIBD*. Obtenido de Viscosidad de hidrocarburos:

<https://es.scribd.com/doc/79155390/VISCOSIDAD-DE-HIDROCARBUROS>

ALS Corplab. (2019). *Toma de muestra y Análisis de lodo / Extracto PECT*. Quito .

ALS Ecuador. (2020). *Toma de muestra y análisis de lodo*. Quito.

Andreo, M. (5 de abril de 2020). *Mendoza Concinet*. Obtenido de

<https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/DBO.htm>

ASOCIACIÓN TÉCNICA DE EMULSIONES BITUMINOSAS. (16 de Junio de 2016). *Ateb*.

Obtenido de PROTOCOLO DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ROTURA DE LAS EMULSIONES BITUMINOSAS CATIONICAS UNE-EN 13075-1: <https://www.ateb.es/index.php/site-administrator/protocolos-de-ensayos/item/203-protocolo-de-ensayo-para-la-determinacion-del-indice-de-rotura-de-las-emulsiones-bituminosas-cationicas-une-en-13075-1-2009>

ATSDR. (5 de abril de 2020). *Agency for toxic substances and disease registry*. Obtenido de

<http://www.cvs.saude.sp.gov.br/pdf/toxfaq111.pdf>

Boletín agrario. (2020 de abril de 2020). Obtenido de <https://boletinagrario.com/ap-6,solidos+totales,4177.html>

Burgos, B. G. (2015). *Slección y formulación de un agente desemulsificante para la deshidratación del crudo, proveniente de la plataforma Abacora, lote Z-1*. Obtenido de

<http://repositorio.unp.edu.pe/bitstream/handle/UNP/871/QUI-ABA-BUR-15.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Cabrerizo, A., Antón Bozal, J. L., & Barrio Pérez, J. (2008). *Física y Química Primero de bachillerato*. Editex.
- Cammarota, M. C., Ehrlich, M., Mendonca, M., & Freire, D. C. (2008). Dewatering of oily slurry using drying bed with geotextile filter. *Geosynthetics International*, 1-5.
- Carmargo Gómez, M. J., & Soto López, R. D. (2012). *Formulación de producto desemulsificante para deshidratación de petróleo crudo en las facilidades de producción del Campo Enterreros*.
- CCSSO. (5 de abril de 2020). *Recurso Nacional Canadiense de Seguridad y Salud Ocupacional*. Obtenido de http://www.ccsso.ca/oshanswers/chemicals/chem_profiles/mek/basic_mek.html
- Cedeño Cedeño, Z., & Villacrés Pilco, M. E. (2013). *Estimación del perjuicio al estado causado por el subsidio otorgado al consumo del gas licuado de petróleo o GLP en el Ecuador y la incidencia de su comercio irregular hacia Colombia y Perú*. Quito.
- Chang, R., & Goldsby, K. A. (2013). *Química*. México: The McGraw-Hill .
- Chavez, M. F. (2012). *DISEÑO DE UN PROCESO BIOLÓGICO DE DEGRADACIÓN PARA LODOS RESIDUALES PROCEDENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS EN UNA ENVASADORA DE GLP*. Quito.
- Cisternas, A. A. (2008). *Reducción de volumen de lodos de planta de tratamiento de aguas urbanas via filtración* . Valparaiso.
- Córdova Martínez, M. V. (Julio de 2012). *Estudio para el tratamiento, manejo y disposición final de lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable*.
- Cosmos. (5 de abril de 2020). Obtenido de <https://www.cosmos.com.mx/wiki/2-4-dinitrotolueno-fgzh.html>
- EcuRed. (5 de abril de 2020). Obtenido de <https://www.ecured.cu/Cresol>
- ENAP. (6 de Enero de 2020). *Glosario ENAP*. Obtenido de ENAP:

- <https://www.enap.cl/pag/232/1012>
- ENI . (marzo de 2019). *eni in China*. Obtenido de https://www.eni.com/en_CN/eni-china/business-areas/quality-certificates/quality-certificates.shtml
- EPA. (1989). *Sampling Procedures and Protocols for the National Sewage Sludge Survey*. Washington.
- EVRICOM. (20 de Enero de 2020). *EVRICOM*. Obtenido de Ceras en petróleo: <https://evricom.bg/es/tipos-de-cera/ceras-de-petroleo/>
- Galigani Filtri. (15 de agosto de 2020). *Filtro prensa Quickdry*. Obtenido de <https://www.galiganifiltri.com/es/filtro-prensa.html>
- García, L. (23 de octubre de 2018). *RECSA Ecologic*. Obtenido de Clasificación del CRETIB : reca-ecologic.com/cretib-residuos-peligrosos/
- Global Petrol Prices*. (30 de marzo de 2020). Obtenido de https://es.globalpetrolprices.com/lpg_prices/
- Glosario Medio Ambiente*. (5 de abril de 2020). Obtenido de <https://glosarios.servidor-alicante.com/medio-ambiente/solidos-volatices>
- Gonzales Toro, C. (20 de octubre de 2011). *Servicio de extensión agrícola*. Obtenido de <http://academic.uprm.edu/gonzalezc/HTMLobj-862/maguaph.pdf>
- GREELANE. (17 de Junio de 2019). *GREELANE*. Obtenido de ¿Qué son los naftenos?: <https://www.greelane.com/es/ciencia-tecnolog%C3%ADa-matem%C3%A1ticas/ciencia/definition-of-naphthenes-605384/#:~:text=Naftenos%20son%20una%20clase%20de,general%20C%20n%20H%20n%20.&text=Petr%C3%B3leo%20crudo%20naft%C3%A9nico%20se%20convierte,la%20sustanci>
- Gualoto Gualoto, J. J. (Diciembre de 2016). Propuesta de gestión de lodos residuales municipales. Caso de estudio: Planta de tratamiento de agua residual de la parroquia

- rural de Nono. *EPN*. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17066>
- Hernández, J. L. (2018). *La química como un desemulsificante en la deshidratación del aceite crudo*. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/26902/La%20qu%C3%ADmica%20como%20un%20desemulsificante%20en%20la%20deshidrataci%C3%B3n%20del%20aceite%20crudo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- IDEAM. (22 de 11 de 2007). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Obtenido de Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de la República de Colombia: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Ox%C3%ADgeno+Disuelto+por+Electrometr%C3%ADa.pdf/9d532efc-805a-4561-94db-a82649af5f91>
- INAMHI. (25-10 de julio de 2020). *Red de Estaciones Automáticas*. Obtenido de <http://186.42.174.236/InamhiEmas/>
- INEC. (5 de abril de 2020). Obtenido de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales/>
- INECC. (15 de noviembre de 2007). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. Obtenido de http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/139/peligro_y_riesgo.html
- Lambe, W. (1969). Soil Mechanics. En W. Lambe, *Soil Mechanics* (pág. 553). Reino Unido: John Willey and Sons.
- Lenntech. (5 de abril de 2020). Obtenido de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cd.htm>
- Limón Macías, J. G. (2013). *Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, Problema o recurso?* Jalisco.
- Marfisi, S., & Salager, J. L. (s.f.). *Deshidratación de crudo principios y tecnología*. Obtenido

- de http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S853PP_Deshidratacion.pdf
- Marfisi, S., Alvarez, G., Paruta, E., Moreno, P., Antón, R., & Salager, J. L. (2009).
Deshidratador electrostático de laboratorio para probar formulaciones desmulsionantes.
Ciencia e Ingeniería, 229-235.
- Metcalf, & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*.
En M. & Eddy, *Ingeniería de aguas residuales* (pág. 538). New York: McGraw Hill.
- Microlab. (5 de abril de 2020). *Microlab Industrial S.A.* Obtenido de
<http://www.microlabindustrial.com/parametros/metales/199/cromo-total>
- Moeller, G., Ramírez, A., Garrido, S., & Días, C. (2005). *Tratamiento y disposición de lodos residuales*. Ciudad de México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Montalvan, C. (5 de abril de 2020). *SlideShare*. Obtenido de
<https://es.slideshare.net/cristhianyersonmontalvancoronel/contenido-de-humedad-del-suelo-43054124>
- OMS. (5 de abril de 2020). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de
<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- Organización Meteorológica Mundial. (2012). *Glosario Internacional de Hidrología*.
Obtenido de OMM:
https://www.wmo.int/pages/prog/hwrr/publications/international_glossary/385_IGH_2012.pdf
- PRTR España. (5 de abril de 2020). *Ministerio de la transición ecológica y el reto demográfico*.
Obtenido de <http://www.prtr-es.es/Endrin,15626,11,2007.html>
- R. Nave, M. O. (15 de enero de 2008). *Hyperphysics*. Obtenido de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Chemical/acidbase.html>
- RISCTOX. (5 de abril de 2020). Obtenido de
https://risctox.istas.net/dn_risctox_ficha_sustancia.asp?id_sustancia=957542

- Rodier, J. (5 de abril de 2020). *drcalderonlabs*. Obtenido de http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis_De_Aguas/Determinacion_de_SST.htm
- Rodríguez, C. H. (5 de abril de 2020). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>
- Rodriguez, M. (7 de Enero de 2019). *SCRIBD*. Obtenido de Contenido de parafinas: <https://es.scribd.com/document/396933640/Contenido-de-parafinas>
- Ron, K. T. (2010). *Optimización de un deshidratador electrostático para crudo, en un centro de facilidades de producción (CPF), utilizanco software especializado*.
- Schlumberger. (15 de Enero de 2020). *Oilfield Glossary*. Obtenido de Gravedad API: https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/a/api_gravity.aspx
- SCRIBD*. (7 de Enero de 2019). Obtenido de Contenido de parafinas: <https://es.scribd.com/document/396933640/Contenido-de-parafinas>
- Standard Methods. (2017). *Métodos estándar para el exámen de agua y aguas residuales*. Obtenido de 2540 SÓLIDOS (2017): <https://www.standardmethods.org/doi/full/10.2105/SMWW.2882.030>
- Torres, P., Marmolejo, L. F., & Botina, A. (2005). *Mejoramiento del potencial agrícola de lodos digeridos anaeróbicamente con el uso de cal*. Cali: Agronomía colombiana.
- U.S. Departament of Energy. (2010). Conceptos básicos sobre el propano. *Clean cities*, 1.
- UAH. (s.f.). *Ácidos y bases*. Obtenido de Introducción a la química inorgánica: http://www3.uah.es/edejesus/resumenes/IQI/tema_5.pdf
- UDLAP. (s.f.). *Colección de Tesis Digitales*. Obtenido de UDLAP: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/morales_r_pm/capitulo4.pdf

Umwelt. (2020). *Informe de ensayos*. Quito.

Vilca Zapana, D. M. (2019). *ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA PUREZA DE LA CALIZA, TAMAÑO DE PARTICULA Y TEMPERATURA PARA OBTENER OXIDO DE CALCIO DE ALTA REACTIVIDAD MEDIANTE UN DISEÑO EXPERIMENTAL 2K*.
Arequipa: Universidad Nacional de San de Agustin de Arequipa.

Yerga, D. M. (8 de mayo de 2010). *Slideshare*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/yerga/reacciones-quimicas-explosivas>

Anexo 2. Informe de resultados laboratorio ALS



ENI ECUADOR S.A. / PLANTA PIFO

TOMA DE MUESTRA Y ANÁLISIS DE LODO



CLIENTE: ENI ECUADOR S.A. / PLANTA PIFO
ATENCIÓN: INGENIERA AMANDA L. ROSERO G. - TÉCNICO HSE
PROYECTO: TOMA DE MUESTRA Y ANÁLISIS DE LODO
DIRECCIÓN: VÍA EL INGA - PIFO



PROTOCOLO: 296804/2020-1.0	RU-49
SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN	Revisión: 12
	Página 1 de 3

NOMBRE DEL CLIENTE: ENI ECUADOR S.A. / PLANTA PIFO
DIRIGIDO EN ATENCIÓN A: INGENIERA AMANDA L. ROSERO G. - TÉCNICO HSE
NOMBRE DEL PROYECTO: TOMA DE MUESTRA Y ANÁLISIS DE LODO
DIRECCIÓN DEL PROYECTO: VÍA EL INGA - PIFO
MUESTREO REALIZADO POR: CORPLABEC S.A. / INGENIERO PEDRO CACUANGO
PROCEDIMIENTO MUESTREO: POS-08.00 "MUESTREO DE SUELOS" (*)
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS: JULIO 24 DEL 2020 / 13:57 / N° CADENA DE CUSTODIA: 0010209
LUGAR DE ANÁLISIS: CORPLABEC S.A. / QUITO - RIGOBERTO HEREDIA OE6-157 Y HUACHI
FECHA DE ANÁLISIS: JULIO 24 AL 21 DE AGOSTO DEL 2020
FECHA DE EMISIÓN DE INFORME: 21 DE AGOSTO DEL 2020

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MATRIZ		LODO				
CÓDIGO DE LABORATORIO	CÓDIGO DE MUESTREO	REFERENCIA	FECHA DE MUESTREO	HORA DE MUESTREO	COORDENADAS UTM WGS 84	OBSERVACIONES
35158	L1	Lodo de Inertización Planta de Tratamiento de Agua	23/07/2020	15:05	17M0794866 9968191	Ninguna observación

REFERENCIAS Y OBSERVACIONES

Laboratorio de Ensayo ALS acreditado por el SAE con Acreditación N° SAE LEN 05-005.
Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE.

SM - Standard Methods.

EPA - Environmental Protection Agency.

Los resultados solo se refieren a las muestras analizadas. ALS declina toda responsabilidad por el uso de los resultados aquí presentados.

"Si las condiciones de muestreo fueron controladas según los Procedimientos Correspondientes establecidos por ALS; éstas no inciden en los resultados que se describen en el presente informe".

Este informe no podrá ser reproducido parcialmente, sin la autorización escrita de ALS.

Sin la firma electrónica del Responsable Técnico, este informe no es válido.


Firmado digitalmente
por MIGUEL ELIAS
MALIZA VERDESOTO
Fecha: 2020.08.21
16:18:04 -05'00'



PROTOCOLO: 296804/2020-1.0	RU-49
SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN	Revisión: 12
	Página 2 de 3

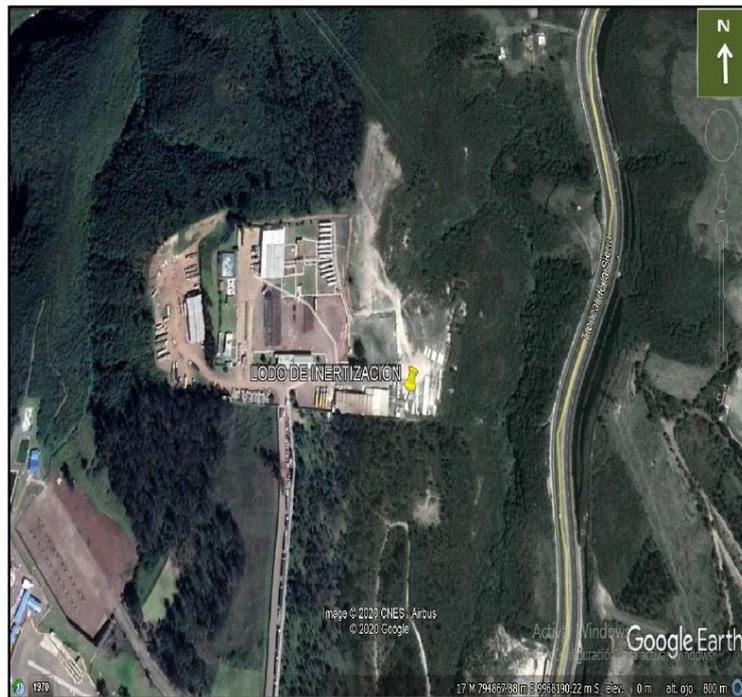
RESULTADOS OBTENIDOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	METODOLOGÍA DE REFERENCIA	MÉTODO INTERNO ALS	UNIDAD	35158	INCERTIDUMBRE (K=2)
				L1	
SÓLIDOS VOLÁTILES TOTALES(*)	Standard Methods Ed. 23, 2017, 2540 E	PA - 79.00	%	6,71	± 0,10 %
HUMEDAD	NMX-AA-16-1984	PA - 85.00	%	36,59	± 0,10 %
SÓLIDOS FIJOS TOTALES(*)	Standard Methods Ed. 23, 2017, 2540 E	PA - 79.00	%	56,12	± 0,10 %
SÓLIDOS TOTALES(*)	Standard Methods Ed. 23, 2017, 2540 A y 2540 B	PA - 14.00	%	62,83	± 0,10 %



PROTOCOLO: 296804/2020-1.0	RU-49
SISTEMA INTEGRADO DE GESTION	Revisión: 12
	Página 3 de 3

CROQUIS DE UBICACIÓN



Anexo 3. Informe de resultados laboratorio Umwelt



INFORME DE ENSAYOS IE-2008-077

Cliente:	Dirección:	Teléfono:	Fax:	Fecha de Recepción:
ENI Ecuador	PLANTA PIFO Vía Sangolquí-Pifo, Km 14 ½	980627579	---	2020-08-05
Persona de contacto:	E-mail:	Oferta:	Número de muestras:	
Amanda Rosero Urbina	Fabian Margarita Auz amanda.rosero@eniececuador.ec fabian.urбина@eniececuador.ec MARGARITA.AUZ@eniececuador.ec	OIL-2007-03	uno	
Tipo de muestra:	Emisión del Informe de Ensayos Fecha	Fecha de análisis: Inicio	Culminación	Responsable(s) de Análisis:
Lodo	2020-08-11	2020-08-05	2020-08-11	Esteban Mallamas

Fecha de muestreo:	2020-08-05
Método de muestreo:	MP 7.3 Muestreo
Lugar de muestreo:	Cajas API
Muestreado por:	Esteban Mallamas

Parámetro	Código Cliente	Código Umwelt	Método	Unidad	Valores
PRUEBA ESTANDAR PARA AGUA Y SEDIMENTO Determinada a 64,4° F * (con adición de rompedor de emulsion)	Muestra de la Caja API numero 1	2008-LD-001	ASTM D96-88	% Vol Sedimentos	38.9
				% Vol Acuoso	52.2
				% Vol Hidrocarburo	8.8
VISCOSIDAD Determinada a 64,4° F *			Norma ASTM D445	cSt	1,16
GRAVEDAD API Determinada a 64,4° F *			ASTM 287-12b	°API	13,77

UMWELT LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL SAE CON ACREDITACION N° OAE LE 2C 06-006

1101940177 WALBERTO EFRAIN GALLEGOS ERAS (R: 1791991389001)
Firmado digitalmente por 1101940177 WALBERTO EFRAIN GALLEGOS ERAS R: 1791991389001 Fecha: 2020.08.12 05:47:43 -05'00'



Ing. Walberto Gallegos
Gerente General

El presente Informe de Ensayos sólo afecta a los objetos sometidos a ensayo, el mismo que no deberá reproducirse parcial o totalmente sin la aprobación por escrito de Umwelt. Los resultados obtenidos son de uso exclusivo del cliente.

UMWELT Cia. Ltda.
Urb. Marisol Calle 11 y 12.
Lote 126 Ponciano Bajo.
Quito - Ecuador

www.umwelt.com
gerente@umwelt-ec.com
Teléfono: (02) 2483164

Página 1 de 2
AMP 7.8-03

INFORME DE ENSAYOS
IE-2008-077

Cliente:	Dirección:	Teléfono:	Fax:	Fecha de Recepción:
ENI Ecuador	PLANTA PIFO Via Sangolquí-Pifo, Km 14 ½	980627579	---	2020-08-05
Persona de contacto:	E-mail:	Oferta:	Número de muestras:	
Amanda Rosero Urbina	Fabian Margarita Auz amanda.rosero@eniececuador.ec fabian.urбина@eniececuador.ec MARGARITA.AUZ@eniececuador.ec	OIL-2007-03	uno	
Tipo de muestra:	Emisión del Informe de Ensayos Fecha	Fecha de análisis: Inicio Culinación		Responsable(s) de Análisis:
Lodo	2020-08-11	2020-08-05	2020-08-11	Esteban Mallamas

Fecha de muestreo:	2020-08-05
Método de muestreo:	MP 7.3 Muestreo
Lugar de muestreo:	Cajas API
Muestreado por:	Esteban Mallamas

Parámetro	Código Cliente	Código Umwelt	Método	Unidad	Valores
PRUEBA ESTANDAR PARA AGUA Y SEDIMENTO Determinada a 64,4° F * (con adición de rompedor de emulsion)	Muestra de la Caja API numero 1	2008-LD-001	ASTM D96-88	% Vol Sedimentos	38.9
				% Vol Acuoso	52.2
				% Vol Hidrocarburo	8.8
VISCOSIDAD Determinada a 64,4° F *			Norma ASTM D445	cSt	1,16
GRAVEDAD API Determinada a 64,4° F *			ASTM 287-12b	°API	13,77

UMWELT LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL SAE CON ACREDITACION N° OAE LE 2C 06-006

1101940177 WALBERTO EFRAIN GALLEGOS ERAS (R: 1791991389001)
Firmado digitalmente por 1101940177 WALBERTO EFRAIN GALLEGOS ERAS R: 1791991389001
Fecha: 2020.08.12 05:47:43 -05'00'



Ing. Walberto Gallegos
Gerente General

El presente Informe de Ensayos sólo afecta a los objetos sometidos a ensayo, el mismo que no deberá reproducirse parcial o totalmente sin la aprobación por escrito de Umwelt. Los resultados obtenidos son de uso exclusivo del cliente.

UMWELT Cía. Ltda.
Urb. Marisol Calle 11 y 12.
Lote 126 Ponciano Bajo.
Quito - Ecuador

www.umwelt.com
gerente@umwelt-ec.com
Teléfono: (02) 2483164

Página 1 de 2
AMP7.8-03

INFORME DE ENSAYOS

IE-2008-077

Ciente:	Dirección:	Teléfono:	Fax:	Fecha de Recepción:
ENI Ecuador	PLANTA PIFO Via Sangolqui-Pifo, Km 14 ½	980627579	---	2020-08-05
Persona de contacto:	E-mail:	Oferta:	Número de muestras:	
Amanda Rosero Urbina	Fabian Margarita Auz amanda.rosero@eniecuador.ec fabian.urbina@eniecuador.ec MARGARITA.AUZ@eniecuador.ec	OIL-2007-03	uno	
Tipo de muestra:	Emisión del Informe de Ensayos Fecha	Fecha de análisis: Inicio Culminación		Responsable(s) de Análisis:
Lodo	2020-08-11	2020-08-05	2020-08-11	Esteban Mallamas

NOTAS DE INTERÉS:

- Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.
- Se separa un resultado de mil con un punto (.) Se separa un resultado de decimal con coma (,)
- NR = No Reporta NA = No Aplica
- VMP : Valores máximos permisibles, no son valores acreditables, su interpretación es responsabilidad del cliente.
- Toda la información referente a los ensayos del presente informe está a disposición del cliente.
- ¹ El presente parametro acreditado bajo la norma NTE INEN ISO-IEC 17025: 2018 N° OAE LE 2C 06-006.
- Los items marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE
- Los resultados solo se refieren a la muestra analizada. UMWELT declina toda responsabilidad por el uso del presente informe .
- Si las condiciones de muestreo fueron controladas según el procedimiento de laboratorio UMWELT, estas no inciden en los resultados que se describen en el presente informe
- UMWELT no se responsabiliza por la información suministrada por el cliente presentada en el informe de ensayo (cliente, dirección, teléfono, persona de contacto, e-mail, tipo de muestra, lugar de muestreo, código de muestra cliente)
- No se ha establecido con el cliente la determinación de cumplimiento o incumplimiento, ni la regla de decisión.
- Siendo aceptado de conformidad los informes de ensayo, o queja del cliente y se requiera algún cambio en los datos de contacto, de la empresa, metodologías y otros datos, se emitirá un informe de ensayo modificado (MAI). El cual debera coincidir con la oferta.

Anexo 4 Análisis CRETIB lodos de la PTAR ENI Ecuador S.A.



ALS Ecuador
Rigoberto Heredia Oe6-157 y Huachi
Quito, Ecuador
T: +59 3 2341 4080

PROTOCOLO: 221760/2019-1.0	RU-49
	Revisión: 12
SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN	Página 4 de 5

RESULTADOS OBTENIDOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	METODOLOGÍA DE REFERENCIA	MÉTODO INTERNO ALS	UNIDAD	26742	INCERTIDUMBRE (K=2)	⁽¹⁾ LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE	⁽²⁾ CRITERIO DE RESULTADOS
				L1			
NITROBENCENO(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD	ALS WATERLOO (PARÁMETRO ACREDITADO)	mg/l	<0,0040	± 0,00040 mg/l	2,0	CUMPLE
PENTAFLUOROFENOL(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	<0,0050	± 0,00050 mg/l	100,0	CUMPLE
TOXAFENO(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	<0,25	± 0,025 mg/l	0,5	CUMPLE
2,4,5-TRICLOROFENOL(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	<0,0050	± 0,00050 mg/l	400,0	CUMPLE
2,4,6-TRICLOROFENOL(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	0,0054	± 0,00054 mg/l	2,0	CUMPLE
BENCENO(*)	EPA 1311 / SW846 8260 - GC/MSD		mg/l	0,477	± 0,048 mg/l	0,5	CUMPLE
CLOROBENCENO(*)	EPA 1311 / SW846 8260 - GC/MSD		mg/l	<0,025	± 0,0025 mg/l	100,0	CUMPLE
CLOROFORMO(*)	EPA 1311 / SW846 8260 - GC/MSD		mg/l	<0,10	± 0,010 mg/l	6,0	CUMPLE
CLORURO DE VINILO(*)	EPA 1311 / SW846 8260 - GC/MSD		mg/l	<0,050	± 0,0050 mg/l	0,2	CUMPLE
1,4-DICLOROBENCENO(*)	EPA 1311 / SW846 8260 - GC/MSD		mg/l	<0,025	± 0,0025 mg/l	7,5	CUMPLE
1,2-DICLOROETANO(*)	EPA 1311 / SW846 8260 - GC/MSD		mg/l	<0,025	± 0,0025 mg/l	0,5	CUMPLE
1,1-DICLOROETILENO(*)	EPA 1311 / SW846 8260 - GC/MSD		mg/l	<0,025	± 0,0025 mg/l	0,7	CUMPLE
HEXACLOROBENCENO(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	<0,0040	± 0,00040 mg/l	0,13	CUMPLE
HEXACLOROBUTADIENO(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	<0,0040	± 0,00040 mg/l	0,5	CUMPLE
METILETIL CETONA(*)	EPA 1311 / SW846 8260 - GC/MSD		mg/l	<1,0	± 0,1 mg/l	200,0	CUMPLE
PIRIDINA(*)	EPA 1311 / SW846 8260D - GC/MSD		mg/l	<2,0	± 0,2 mg/l	5,0	CUMPLE
TETRAFLUOROETILENO(*)	EPA 1311 / SW846 8260 - GC/MSD		mg/l	<0,025	± 0,0025 mg/l	0,7	CUMPLE
TETRAFLUORURO DE CARBONO(*)	EPA 1311 / SW846 8260 - GC/MSD	mg/l	<0,025	± 0,0025 mg/l	0,5	CUMPLE	
TRICLOROETILENO(*)	EPA 1311 / SW846 8260 - GC/MSD	mg/l	<0,025	± 0,0025 mg/l	0,5	CUMPLE	

REFERENCIAS Y OBSERVACIONES

La información (1), (2) que se indican a continuación, están FUERA del alcance de acreditación del SAE.

⁽¹⁾ Acuerdo Ministerial N° 061, TULSMA, Libro VI, Título III, Capítulo VI: Gestión Integral de Residuos Sólidos No Peligrosos y Desechos Peligrosos y/o Especiales, Sección II, Art. 79.- Para determinar si un desecho debe ser o no considerado como peligroso, la caracterización del mismo deberá realizarse conforme las normas técnicas establecidas por la Autoridad Ambiental Nacional y/o la Autoridad Nacional de Normalización o en su defecto por normas técnicas aceptadas a nivel internacional, acogidas de forma expresa por la Autoridad Ambiental Nacional. CFR 40, USA, 2014, Title 40, Chapter 1, Subchapter 0, Part 261. Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge. Subpart C: Characteristics of Hazard Waste.

⁽²⁾ Criterio de resultados.



PROTOCOLO: 221760/2019-1.0	RU-49
	Revisión: 12
	Página 3 de 5
SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN	

RESULTADOS OBTENIDOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	METODOLOGÍA DE REFERENCIA	MÉTODO INTERNO ALS	UNIDAD	26742	INCERTIDUMBRE (K=2)	⁽¹⁾ LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE	⁽²⁾ CRITERIO DE RESULTADOS
				L1			
CROMO TOTAL	EPA 3010 A, Rev. 01, 1992 Standard Methods Ed. 22, 2012, 3111 B	PA - 18.00	mg/l	0,12	± 0,01 mg/l	5,0	CUMPLE
MERCURIO	Standard Methods Ed. 22, 2012, 3112 B	PA - 57.00	mg/l	<0,002	± 0,0004 mg/l	0,2	CUMPLE
PLATA	EPA 3050 B, Rev. 02, 1996 EPA 7760 A, Rev. 01, 1992 Standard Methods Ed. 22, 2012, 3111 B	PA - 23.00	mg/l	<0,05	± 0,01 mg/l	5,0	CUMPLE
PLOMO	EPA 3010 A, Rev. 01, 1992 Standard Methods Ed. 22, 2012, 3111 B	PA - 09.00	mg/l	0,21	± 0,03 mg/l	5,0	CUMPLE
SELENIO(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD	ALS WATERLOO (PARÁMETRO ACREDITADO)	mg/l	<0,025	± 0,0025 mg/l	1,0	CUMPLE
ÁCIDO 2,4-DICLOROFENOXIACÉTICO (2,4-D)(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	<0,0020	± 0,00020 mg/l	10,0	CUMPLE
ÁCIDO 2,4,5-TRICLOROFENOXIPROPIONICO (SILVEX)(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	<0,0020	± 0,00020 mg/l	1,0	CUMPLE
CLORDANO(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	<0,0010	± 0,00010 mg/l	0,03	CUMPLE
O-CRESOL(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	3,93	± 0,393 mg/l	200,0	CUMPLE
M-CRESOL(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	3,93	± 0,393 mg/l	200,0	CUMPLE
P-CRESOL(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	3,93	± 0,393 mg/l	200,0	CUMPLE
CRESOL(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	11,8	± 1,18 mg/l	200,0	CUMPLE
2,4-DINITROTOLUENO(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	0,0320	± 0,0032 mg/l	0,13	CUMPLE
ENDRIN(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	<0,0010	± 0,00010 mg/l	0,02	CUMPLE
HEPTACLORO(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	<0,0010	± 0,00010 mg/l	0,008	CUMPLE
HEPTACLORO EPÓXIDO(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	<0,0010	± 0,00010 mg/l	0,008	CUMPLE
HEXACLOROETANO(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	<0,0040	± 0,00040 mg/l	3,0	CUMPLE
LINDANO(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	<0,0010	± 0,00010 mg/l	0,4	CUMPLE
METOXICLORO(*)	EPA 1311 / SW846 8270 - GC/MSD		mg/l	<0,0010	± 0,00010 mg/l	10,0	CUMPLE

REFERENCIAS Y OBSERVACIONES

La información (1), (2) que se indican a continuación, están FUERA del alcance de acreditación del SAE.

⁽¹⁾ Acuerdo Ministerial N° 061, TULSMA, Libro VI, Título III, Capítulo VI: Gestión Integral de Residuos Sólidos No Peligrosos y Desechos Peligrosos y/o Especiales, Sección II, Art. 79.- Para determinar si un desecho debe ser o no considerado como peligroso, la caracterización del mismo deberá realizarse conforme las normas técnicas establecidas por la Autoridad Ambiental Nacional y/o la Autoridad Nacional de Normalización o en su defecto por normas técnicas aceptadas a nivel internacional, acogidas de forma expresa por la Autoridad Ambiental Nacional. CFR 40, USA, 2014, Title 40, Chapter 1, Subchapter 0, Part 261. Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge. Subpart C: Characteristics of Hazard Waste.

⁽²⁾ Criterio de resultados.



PROTOCOLO: 221760/2019-1.0	RU-49
	Revisión: 12
SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN	Página 2 de 5

RESULTADOS OBTENIDOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	METODOLOGÍA DE REFERENCIA	MÉTODO INTERNO ALS	UNIDAD	26742	INCERTIDUMBRE (K=2)	⁽¹⁾ LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE	⁽²⁾ CRITERIO DE RESULTADOS
				L1			
CORROSIVIDAD							
POTENCIAL DE HIDRÓGENO	EPA 9045 D; Rev. 04; 2004	PA - 05.00	UpH	5,79	± 0,11 U pH	≥ 2 ≤ 12,5	CUMPLE
REACTIVIDAD							
REACCIÓN CON AGUA(*)	NOM-052-SEMARNAT/93	MÉTODO INTERNO	N.A	NO REACCIONA	-	NO REACCIONA	CUMPLE
REACCIÓN CON ÁCIDO(*)	NOM-052-SEMARNAT/93	MÉTODO INTERNO	N.A	NO REACCIONA	-	NO REACCIONA	CUMPLE
REACCIÓN CON ÁLCALI(*)	NOM-052-SEMARNAT/93	MÉTODO INTERNO	N.A	NO REACCIONA	-	NO REACCIONA	CUMPLE
GENERACIÓN DE HCN	EPA 9014	MÉTODO INTERNO	mg/kg	0,19	± 0,019 mg/kg	250 HCN	CUMPLE
GENERACIÓN DE H ₂ S(*)	EPA 9034	MÉTODO INTERNO	mg/kg	<3,00	± 0,3 mg/kg	500 H ₂ S	CUMPLE
EXPLOSIVIDAD							
REACCIÓN O DESCOMPOSICIÓN DETONANTE O EXPLOSIVA(*)	NOM-052-SEMARNAT/93	MÉTODO INTERNO	N.A	NO REACCIONA	-	NO REACCIONA NO SE DESCOMPONE	CUMPLE
INFLAMABILIDAD							
PUNTO DE INFLAMACIÓN SI ES LÍQUIDO(*)	EPA 1010 A	METODO INTERNO	°C	NO APLICA	-	>60	NO APLICA
CAPAZ DE PROVOCAR FUEGO SI NO ES LÍQUIDO(*)	NOM-052-SEMARNAT/93	METODO INTERNO	N.A	SI ES CAPAZ	-	NO ES CAPAZ	NO CUMPLE
ES GAS COMPRIMIDO INFLAMABLE U OXIDANTE(*)	NOM-052-SEMARNAT/93	METODO INTERNO	N.A	NO LO ES	-	NO LO ES	CUMPLE
METALES							
ARSÉNICO	Standard Methods Ed. 22, 2012, 3114 B	PA - 87.00	mg/l	<0,002	± 0,0003 mg/l	5,0	CUMPLE
BARIO	EPA 3010 A, Rev. 01, 1992 Standard Methods Ed. 22, 2012, 3111 D	PA - 22.00	mg/l	<0,50	± 0,14 mg/l	100,0	CUMPLE
CADMIO	EPA 3010 A, Rev. 01, 1992 Standard Methods Ed. 22, 2012, 3111 B	PA - 07.00	mg/l	<0,02	± 0,01 mg/l	1,0	CUMPLE

REFERENCIAS Y OBSERVACIONES

La información (1), (2) que se indica a continuación, están FUERA del alcance de acreditación del SAE.

⁽¹⁾ Acuerdo Ministerial N° 061, TULSMA, Libro VI, Título III, Capítulo VI: Gestión Integral de Residuos Sólidos No Peligrosos y Desechos Peligrosos y/o Especiales, Sección II, Art. 79 - Para determinar si un desecho debe ser o no considerado como peligroso, la caracterización del mismo deberá realizarse conforme las normas técnicas establecidas por la Autoridad Ambiental Nacional y/o la Autoridad Nacional de Normalización o en su defecto por normas técnicas aceptadas a nivel internacional, acogidas de forma expresa por la Autoridad Ambiental Nacional. CFR 40, USA, 2014, Title 40, Chapter 1, Subchapter 0, Part 261. Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge. Subpart C: Characteristics of Hazard Waste.

⁽²⁾ Criterio de resultados.



PROTOCOLO: 221760/2019-1.0	RU-49
SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN	Revisión: 12
	Página 1 de 5

NOMBRE DEL CLIENTE: ENI ECUADOR S.A. / PLANTA PIFO
DIRIGIDO EN ATENCIÓN A: INGENIERA AMANDA L. ROSERO G. - TÉCNICO HSE
NOMBRE DEL PROYECTO: TOMA DE MUESTRA Y ANÁLISIS DE LODO / EXTRACTO PECT
DIRECCIÓN DEL PROYECTO: VÍA EL INGA - PIFO
MUESTREO REALIZADO POR: CORPLABEC S.A. / TÉCNICO XAVIER CUYAGO
PROCEDIMIENTO MUESTREO: POS-08.00 "MUESTREO DE SUELOS" (*)
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS: ABRIL 19 DEL 2019 / 11:32 / Nº CADENA DE CUSTODIA: 0002247
LUGAR DE ANÁLISIS: CORPLABEC S.A. / QUITO - RIGOBERTO HEREDIA OE6-157 Y HUACHI
FECHA DE ANÁLISIS: ABRIL 19 AL 23 DE MAYO DEL 2019
FECHA DE EMISIÓN DE INFORME: 23 DE MAYO DEL 2019

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MATRIZ	LODO					
	CÓDIGO DE LABORATORIO	CÓDIGO DE MUESTREO	REFERENCIA	FECHA DE MUESTREO	HORA DE MUESTREO	COORDENADAS UTM WGS 84
26742	L1	Lodo de Inertización	18/04/2019	14:55	17M0794836 9968180 ± 5m	Ninguna observación

REFERENCIAS Y OBSERVACIONES

Muestra sometida a Extracción TCLP

Laboratorio de Ensayo ALS acreditado por el SAE con Acreditación Nº SAE LEN 05-005.
Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE.

Los resultados Selenio, Pesticidas, BNA, Pesticidas Organoclorados, VOC's no forman parte del alcance de acreditación de ALS y fueron suministrados por el Laboratorio ALS CANADÁ - WATERLOO / ACREDITACIÓN Nº CALA A3149 (ILAC - MRA).

SM - Standard Methods. La versión utilizada para la realización de los análisis corresponde a la Ed. 22, 2012. La actualización a la Ed. 23, 2017; se encuentra en proceso.
EPA - Environmental Protection Agency.

Los resultados solo se refieren a las muestras analizadas. ALS declina toda responsabilidad por el uso de los resultados aquí presentados.

"Si las condiciones de muestreo fueron controladas según los Procedimientos Correspondientes establecidos por ALS; éstas no inciden en los resultados que se describen en el presente informe".

Este informe no podrá ser reproducido parcialmente, sin la autorización escrita de ALS.

Sin la firma electrónica del Responsable Técnico, este informe no es válido.

Firmado digitalmente por MIGUEL ELIAS MALIZA VERDESOTO
Fecha: 2019-05-23
16:37-05:00



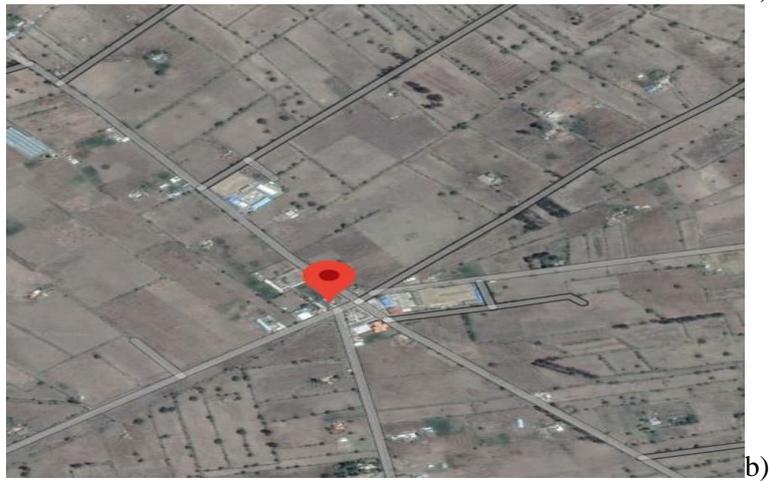


PROTOCOLO: 221760/2019-1.0	RU-49
	Revisión: 12
	Página 5 de 5
SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN	

CROQUIS DE UBICACIÓN



Anexo 5. Imágenes satelitales de las ubicaciones a) Sangolquí, Valle de los Chillos b) Pujilí



Anexo 6. Almacenamiento de cilindros con lodos de la PTAR



Anexo 7. Cajones con lodo tratamiento de secado solar localidad 1 y 2



Anexo 8. Análisis de contenido de humedad, crisoles dentro de estufa y desecador



Anexo 9. Evaporación de muestras para análisis de sólidos totales, fijos y volátiles



Anexo 10. Análisis de composición granulométrica



Anexo 11. Tratamiento de acondicionamiento químico al inicio y finalización respectivamente

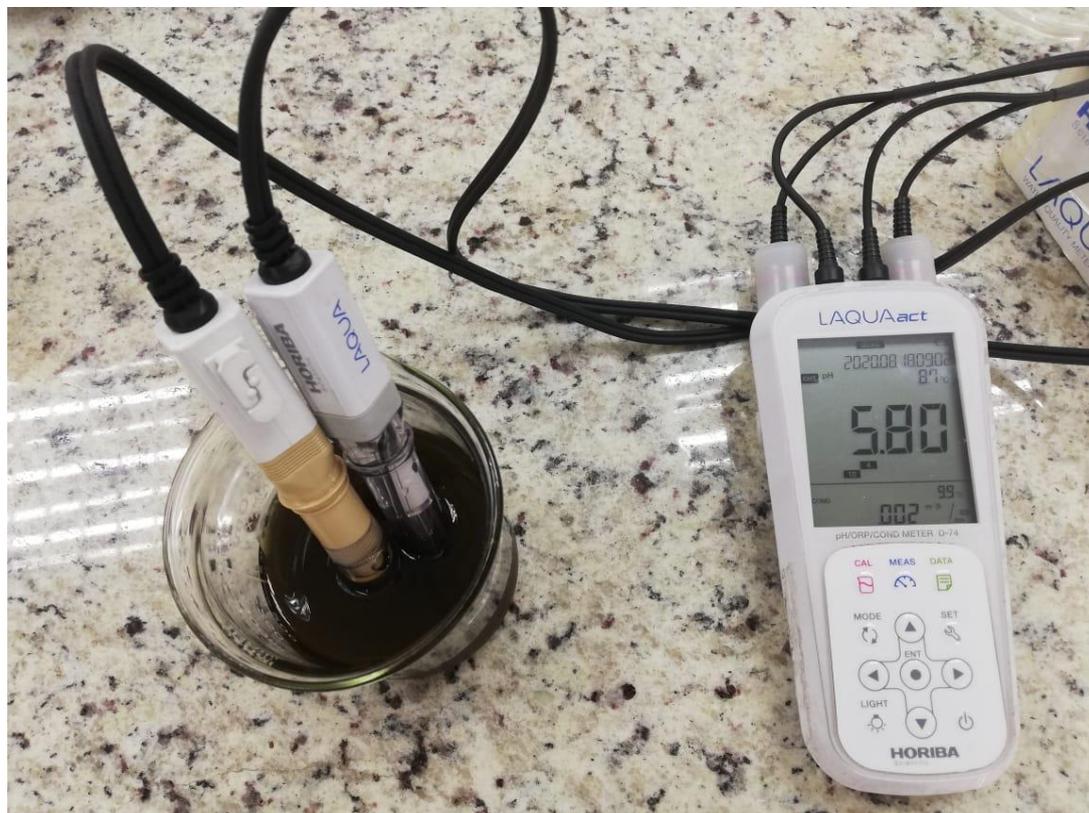




Anexo 12. Tratamiento de filtración en localidad 2



Anexo 13. Determinación del pH de la muestra de estudio en instalaciones de la UPS



Anexo 14. Toma de muestras para análisis de contenido de humedad del tratamiento de secado solar y acondicionamiento químico respectivamente



Anexo 15. Evidencia estado final del tratamiento de filtración, específicamente filtro N° 10



Anexo 16. Factura de compra de cal viva

R.U.C. 1791293908001
FACTURA
 S001-002-
0048378

05.4249
 Cliente: LOPEZ KARINA
 Atención:
 Dirección: SANGOLQUI
 Observación: CONTADO

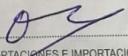
A152970
 E48378
 RUC: 1104597156001
 Teléfono: 2080418
 Fecha: 05/08/2020
 Gula: 00100200048380
 Factura: 00100200048378

CODIGO	PRODUCTO	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
0373	CAL VIVA /KG.	25.00	0.300	7.50
Subtotal				7.50
IVA				0.90
Total:				8.40

Este documento será pagadero inmediatamente en la fecha de su vencimiento, su falta de pago dará derecho a QUÍMICOS EXPORTACIONES E IMPORTACIONES RELUBQUIM CIA. LTDA. a cobrar, además el máximo interés de mora legalmente permitido. Autorizo a verificar la información de tipo comercial relacionada a mi persona y/o empresa en cualquier Buró de Crédito, de igual forma autorizo a referir y/o publicar información crediticia a mi nombre o el de mi Representada en los Burós de crédito legalmente autorizados por la SUPERINTENDENCIA DE BANCOS.

NO SE ACEPTA DEVOLUCIONES

Firma Cliente: 
 Nombre: Karina Lopez
 C.I.: 1104597156

Por QUÍMICOS EXPORTACIONES E IMPORTACIONES RELUBQUIM CIA. LTDA. 

DOCUMENTO NO VÁLIDO PARA EFECTOS TRIBUTARIOS
 Para descargar su documento Ingrese a www.facturacionelectronicaecuador.com

Anexo 17. Script de Rstudio utilizado para el análisis de varianza y test de Tukey

```

library(readxl)
Tratamientos <- read_excel("C:/Users/USUARIO/Desktop/Universidad/Tesis/TESIS/Prueba piloto analisis estadistico/Tratamientos.xlsx")
View(Tratamientos)
attach(Tratamientos)
names(Tratamientos)
class(Tratamiento)
class("Contenido de humedad final")
factor(Tratamiento)
summary(Tratamientos)
library(rapportools)
boxplot("Contenido de humedad final"~Tratamiento,
        main="ANOVA", notch=F, col="red")
aov("Contenido de humedad final"~Tratamiento)
anova1=aov("Contenido de humedad final"~Tratamiento)
summary(anova1)
TukeyHSD(anova1)
tukeytratamientos=TukeyHSD(anova1)
plot(tukeytratamientos)
  
```