



Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Carrera de Posgrado de Especialización en Ingeniería Sanitaria

TRABAJO FINAL

**TEMA: “Tratamiento de barros generados en plantas de
remoción de arsénico por procesos de coagulación-
adsorción-filtración”**

ALUMNO: Ing. Carla E. Murillo

DIRECTOR: Dra. Ing. Ana María Ingallinella

CODIRECTOR: Dra. Ing. Virginia A. Pacini

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	7
2.	OBJETIVOS.....	7
3.	GENERALIDADES	8
4.	NORMATIVA VIGENTE.....	9
4.1	LÍMITES PARA EL AGUA DE BEBIDA.....	9
4.1.1	Normativa existente para residuos con contenido de As	10
5.	TECNOLOGÍAS PARA REMOCIÓN DE AS: INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	10
5.1	TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES	11
5.1.1	Oxidación-Reducción	11
5.1.2	Coagulación y filtración	11
5.1.3	Ablandamiento con cal.....	12
5.1.4	Adsorción y precipitación	12
5.2	PROCESOS DE MEMBRANAS	13
5.2.1	Nanofiltración (NF).....	13
5.2.2	Ultrafiltración (UF).....	13
5.2.3	Microfiltración (MF).....	14
5.2.4	Osmosis inversa (OI).....	14
5.2.5	Resinas de intercambio iónico	14
5.3	TECNOLOGÍAS EMERGENTES	15
5.3.1	Remediación in situ	15
5.3.2	Materiales geológicos como adsorbentes naturales.....	15
5.4	REMOCIÓN DE AS POR PROCESOS DE COAGULACIÓN-ADSORCIÓN-FILTRACIÓN: PROCESO ARCIS-UNR®	16
6.	RESIDUOS GENERADOS EN PLANTAS DE REMOCIÓN DE AS.....	19
6.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS GENERADOS EN LAS PLANTAS DE REMOCIÓN DE AS POR PROCESOS DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN-ADSORCIÓN-FILTRACIÓN.....	20
6.1.1	Sólidos totales.....	20
6.1.2	Sólidos sedimentables: CONO IMHOFF.....	20
6.1.3	Sólidos en suspensión:.....	21
6.1.4	Determinación de contenido de humedad:.....	21
6.1.5	Toxicidad:.....	21
7.	TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS/SÓLIDOS: ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	23
7.1	ESPEZAMIENTO DE LODOS	23
7.1.1	Espesadores a gravedad.....	23
7.2	MÉTODOS MECÁNICOS DE DESHIDRATACIÓN DE BARROS	25
7.2.1	Filtro de tambor al vacío.....	25
7.2.2	Filtro de bandas	26
7.2.3	Centrífugas	27
7.2.4	Filtro prensa	28
7.2.5	Comparación de los sistemas de deshidratación mecánica	29
7.3	MÉTODOS NO MECÁNICOS PARA LA DESHIDRATACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS/LÍQUIDOS	30
7.3.1	Playas de secado	30
7.3.2	Deshidratación de lodo con sistema cubierto.....	32
7.3.3	Lagunas de secado.....	38
7.3.4	Deshidratación de barros mediante geotubos	39
7.3.5	Diseño de lecho de drenaje y sedimentador para reducir el volumen del lodo en decantadores. Experiencia realizada en Brasil.....	40

8.	PROCESO ARCIS-UNR®. RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN	43
8.1	<i>VISITA A LA PLANTA POTABILIZADORA DE LEZAMA, PROVINCIA DE BUENOS AIRES.....</i>	43
8.1.1	<i>Línea de tratamiento de barros.....</i>	43
8.2	<i>VISITA A LA PLANTA POTABILIZADORA DE VILLA CAÑAS, PROVINCIA DE SANTA FE.....</i>	46
8.3	<i>CARACTERIZACIÓN DE LOS BARROS DE PLANTAS RELEVADAS:</i>	47
8.3.1	<i>Ensayo propuesto por Carl Adams</i>	49
9.	ENSAYOS EN LABORATORIO	52
9.1	<i>METODOLOGÍA</i>	52
9.1.1	<i>Diseño y construcción de reactores:</i>	52
9.1.2	<i>Descripción de los ensayos realizados</i>	53
9.1.3	<i>Ensayo 1: Reactores con distinta granulometría y caudal de percolado constante.....</i>	54
9.1.4	<i>Ensayo 2: Reactor A y B con igual granulometría y caudal de percolado variable.....</i>	54
9.1.5	<i>Ensayo 3: Comportamiento de reactores con mantos filtrantes limpios y sucios.....</i>	55
9.1.6	<i>Ensayo 4: Comportamiento de reactores con distintas cargas</i>	55
9.1.7	<i>Ensayo 5: Aumento de tiempo entre cargas</i>	56
9.2	<i>RESULTADO Y DISCUSIÓN DE ENSAYOS EN LABORATORIO</i>	58
9.3	<i>CONCLUSIONES</i>	70
10.	REACTORES A ESCALA PILOTO.....	71
10.1	<i>DISEÑO DE REACTORES</i>	71
10.2	<i>ENSAYOS</i>	73
10.2.1	<i>Ensayo 1: Período septiembre- noviembre.....</i>	73
10.3	<i>ENSAYO 2</i>	85
10.3.1	<i>Registro de temperatura, volumen de percolado y precipitaciones.....</i>	85
10.3.2	<i>Determinación de As y turbiedades en percolado (M3).....</i>	88
10.3.3	<i>Sólidos totales (M1 y M3).....</i>	89
11.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93

Índice de Tablas:

TABLA 1: TIPOS DE TRATAMIENTOS Y LOS RESIDUOS QUE SE GENERAN (CRISANTO 2012).....	19
TABLA 2: DIFERENCIAS ENTRE EL TCLP Y EL CALIFORNIA WET	22
TABLA 3: COMPARACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS SISTEMAS DE DESHIDRATACIÓN MECÁNICA FUENTE: INDITEX	30
TABLA 4: SÓLIDOS TOTALES Y HUMEDAD EN BARROS PROVENIENTES DE PILETA DE RECUPERACIÓN	48
TABLA 5: SÓLIDOS SEDIMENTABLES, BARROS BOMBEADOS HACIA PLAYA DE SECADO. (LEZAMA).....	48
TABLA 6: SÓLIDOS SEDIMENTABLES, BARROS BOMBEADOS HACIA LAGUNA DE SECADO. (VILLA CAÑÁS).....	48
TABLA 7: CONTENIDO DE HUMEDAD DE BARROS EN PLAYA Y LAGUNA EN PROCESO DE SECADO	49
TABLA 8: CARACTERIZACIÓN DE BARROS A EMPLEAR EN ENSAYOS	53
TABLA 9: CAUDAL INICIAL DE PERCOLADO.....	55
TABLA 10: RESUMEN DE ENSAYOS REALIZADOS EN LABORATORIO	57
TABLA 11 : HUMEDAD INICIAL Y FINAL, ETAPA DE EVAPORACIÓN.	61
TABLA 12: HUMEDAD INICIAL Y FINAL, ETAPA DE EVAPORACIÓN.	63
TABLA 13: HUMEDADES INICIALES Y FINAL ETAPA DE EVAPORACIÓN.....	66
TABLA 14: DETERMINACIONES SEGÚN LOS PUNTOS DE MUESTREO	74
TABLA 15: AS, AL, Y TURBIEDAD EN PERCOLADO.....	80
TABLA 16: AS, AL, Y TURBIEDAD EN PERCOLADO.....	88

Índice de Figuras:

FIGURA 1: ESQUEMA DEL PROCESO ARCIS-UNR®	17
FIGURA 2: LÍNEA DE TRATAMIENTO DE BARROS.....	17
FIGURA 3: ESTRUCTURA DE LAS PLAYAS DE SECADO	18
FIGURA 4: CONO IMHOFF	21
FIGURA 5: ESPESADOR A GRAVEDAD-PLANTA	24
FIGURA 6: ESPESADOR A GRAVEDAD-CORTE. FUENTE: UNIVERSIDAD DE CORUÑA (TECNOLOGÍAS DE ESPESAMIENTO (FT-FNG-001), SUAREZ LÓPEZ;ET AL).....	24
FIGURA 7: ESQUEMA TÍPICO DE UN FILTRO DE TAMBOR AL VACÍO. FUENTE: G.U.N.T.	26
FIGURA 8: ESQUEMA TÍPICO FILTRO DE BANDAS. FUENTE: UNIVERSIDAD DE CORUÑA. TECNOLOGÍAS DE DESHIDRATACIÓN DE FANGOS	27
FIGURA 9: ESQUEMA TÍPICO CENTRÍFUGA. FUENTE: FLOTTWEG	28
FIGURA 10: ESQUEMA DE UN FILTRO PRENSA. FUENTE: INDITEX	29
FIGURA 11: CROQUIS INGRESO DE BARROS. FUENTE: INDITEX.....	29
FIGURA 12: SECCIÓN TÍPICA DE PLAYAS DE SECADO. FUENTE: USEPA 1996.....	30
FIGURA 13: FASES DEL SECADO DEL BARRO. FUENTE ADAMS ET. ALL. 1981.....	31
FIGURA 14: ESQUEMA SIMPLIFICADO: PLAYA DE SECADO CON COBERTURA PLÁSTICA Y RENOVACIÓN DE AIRE (FUENTE: FELCIO DOS REIS ET AL, 2011).....	32
FIGURA 15: SECADO DE BARROS POR RADIACIÓN. FUENTE: WWW.WENDEWOLF.COM	33
FIGURA 16: SECADO DE BARROS POR RADIACIÓN Y VENTILADORES AXIALES.....	33
FIGURA 17: DISPOSICIÓN DE LODO EN PLANTA DE TRATAMIENTO DE DESAGÜES CLOACALES EN LÍNEAS DE COMPOSTAJE (FUENTE: FELCIO DOS REIS ET AL, 2011)	34
FIGURA 18: INTERIOR DE PLAYA DE SECADO CUBIERTA DE PLANTA DE TRATAMIENTO (FUENTE: FELCIO DOS REIS ET AL, 2011)	35
FIGURA 19: PLAYAS DE SECADO CUBIERTAS, PLANTA DE TRATAMIENTO SAO LUIZ DO PARAITINGA (FUENTE: FELCIO DOS REIS ET AL, 2011).....	35
FIGURA 20: ESQUEMA PLAYAS DE SECADO CUBIERTAS, PLANTA DE TRATAMIENTO DE EMBAÚ, CACHEIRA PAULISTA-SP	36
FIGURA 21: ESQUEMA DE LA PLANTA DE SECADO SOLAR CUBIERTA DE LA CIUDAD DE BURSA, TURQUÍA. (FUENTE: SALIHOGLU ET.A.L, 2006).....	37
FIGURA 22: BAGS INSTALADOS EN LA PLANTA DE CURITIBANOS-SC (Q=90L/s)	39
FIGURA 23: BAGS INSTALADOS EN LA PLANTA DE SAN ANTONIO-SP (Q=15L/s).....	40
FIGURA 24: MODIFICACIÓN DE LOS LECHOS DE SECADO. (FONTANA, ET AL 2004).....	41
FIGURA 25: PROTOTIPO DE LECHO DE DRENAJE (CORDEIRO, ET.AL 2001).....	42
FIGURA 26: ASPECTO DEL LODO APLICADO EN EL PROTOTIPO DEL LECHO DE DRENAJE LUEGO DEL DRENAJE DE AGUA LIBRE (CORDEIRO ET.AL 2001).....	42
FIGURA 27: PILETA DE RECUPERACIÓN, PLANTA ARCIS-UNR®, LEZAMA Pcia. DE Bs. AS.	43
FIGURA 28: BOMBEO DE BARROS HACIA LA PLAYA DE SECADO	44
FIGURA 29: PLAYA EN PROCESO DE SECADO.....	44
FIGURA 30: BARROS EN SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL	45
FIGURA 31: DISPOSICIÓN FINAL DE BARROS	45
FIGURA 32: PILETA DE LAVADO.....	46
FIGURA 33: LAGUNA DE SECADO (EN OPERACIÓN AL MOMENTO DE LA VISITA)	47
FIGURA 34: LAGUNA EN PROCESO DE SECADO	47
FIGURA 35: EQUIPO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR CONTENIDO DE SÓLIDOS(ADAMS, ET AL 1981).	50
FIGURA 36: ESQUEMA REACTOR. TODAS LAS MEDIDAS SE ENCUENTRAN EN CM.	52
FIGURA 37: DETALLE MANTOS FILTRANTES REACTORES A Y B. ALTURA TOTAL DE LOS MANTOS 40CM.	53
FIGURA 38: COLOCACIÓN DE CERÁMICOS.....	54
FIGURA 39: MODIFICACIÓN DE REACTORES	55
FIGURA 40: VARIACIÓN DEL PERCOLADO RESPECTO AL TIEMPO	58

FIGURA 41: COMIENZO DEL ENSAYO	59
FIGURA 42: BARRO EN REACTOR A, LUEGO DE 72 HS DE PERMANENCIA	59
FIGURA 43: TURBIEDADES MEDIDAS EN PERCOLADO	60
FIGURA 44: VARIACIÓN DEL PERCOLADO RESPECTO AL TIEMPO.....	60
FIGURA 45: DÍA 7 DE CARGA: EL REACTOR A PRESENTA BARRO SOBRE LA SUPERFICIE, MIENTRAS QUE EN EL REACTOR B AÚN NO SE HA FORMADO LA TORTA DE BARRO	61
FIGURA 46: VARIACIÓN DE LA TURBIEDAD RESPECTO AL TIEMPO.....	62
FIGURA 47: VARIACIÓN DEL PERCOLADO RESPECTO AL TIEMPO.....	63
FIGURA 48: REACTOR A Y B RESPECTIVAMENTE AL INICIO DE LA CARGA. LA CARGA EN EL REACTOR A PERCOLA EN SU TOTALIDAD MIENTRAS QUE EN EL B COMIENZA A FORMARSE LA TORTA DE BARRO	64
FIGURA 49: REACTOR A Y B RESPECTIVAMENTE DURANTE EL 4TO DÍA DE ENSAYO. SE FORMA UNA PEQUEÑA CAPA DE BARRO EN EL REACTOR A MIENTAS QUE EN EL B LUEGO DE 24 HS. DE REALIZADA LA CARGA AÚN PRESENTA SOBRENADANTE..	64
FIGURA 50: REACTOR A Y B RESPECTIVAMENTE DURANTE EL 7MO DÍA DE ENSAYO. AMBOS PRESENTAN SOBRENADANTE PERO SE OBSERVA QUE EL DEL REACTOR B ES MÁS ELEVADO QUE EL A.	64
FIGURA 51: VARIACIÓN DEL PERCOLADO RESPECTO AL TIEMPO	65
FIGURA 52: VARIACIÓN DE TURBIEDAD RESPECTO AL TIEMPO	66
FIGURA 53: DÍA 9—REACTOR A Y B RESPECTIVAMENTE (ETAPA DE CARGA) — EN AMBOS REACTORES APARECE SOBRENADANTE LUEGO DE LA CARGA, SIENDO MAYOR EN EL REACTOR A	67
FIGURA 54: DÍA 12—REACTOR A (ÚLTIMO DÍA DE CARGA.....	67
FIGURA 55: DÍA 20—REACTOR B (ETAPA DE CARGA)	67
FIGURA 56: VARIACIÓN DEL PERCOLADO RESPECTO AL TIEMPO.....	68
FIGURA 57: VARIACIÓN DE LA TURBIEDAD RESPECTO AL TIEMPO.....	69
FIGURA 58: DÍA 9—REACTOR A Y REACTOR B RESPECTIVAMENTE (ETAPA DE CARGA). SE OBSERVA MAYOR CANTIDAD DE BARRO Y SOBRENADANTE EN LA COLUMNA A	69
FIGURA 59: DÍA 18— REACTOR A Y REACTOR B RESPECTIVAMENTE (ETAPA DE SECADO). EN AMBOS REACTORES SE FORMÓ LA TORTA DE BARRO, PERO SE APRECIA UN ESPESOR MAYOR EN EL REACTOR A.	70
FIGURA 60: PROCESO DE ARMADO DE LAS PLAYAS-MANTOS INFERIORES DE GRAVA.....	71
FIGURA 61: PROCESO DE ARMADO DE LAS PLAYAS-MANTOS SUPERIOR DE ARENA Y TEJUELAS	71
FIGURA 62: ESQUEMA PLAYAS DE SECADO A ESCALA PILOTO	72
FIGURA 63: TERMÓMETROS DIGITALES	72
FIGURA 64: PLUVIÓMETRO INSTALADO EN LAS INMEDIACIONES DE LA PLANTA.....	73
FIGURA 65: PLAYAS DE SECADO EN PREDIO DE PLANTA POTABILIZADORA, VILLA CAÑÁS.....	74
FIGURA 66: TEMPERATURAS MÍNIMAS REGISTRADAS DURANTE LA EXPERIENCIA EN AMBAS PLAYAS.....	75
FIGURA 67: TEMPERATURAS MÁXIMAS REGISTRADAS DURANTE LA EXPERIENCIA.....	76
FIGURA 68: BOXPLOT, CORRESPONDIENTE A TEMPERATURAS DIARIAS REGISTRADAS	76
FIGURA 69: VOLUMEN DE PERCOLADO DE AMBAS PLAYAS Y PRECIPITACIONES DURANTE LA DURACIÓN DEL ENSAYO	77
FIGURA 70: DÍA 14 DE OPERACIÓN, PREVIO A LA CARGA DEL BARRO.....	78
FIGURA 71: DÍA 17 DE OPERACIÓN, PREVIO A LA CARGA DEL BARRO.....	79
FIGURA 72: DETERMINACIÓN DE AS, AL Y TURBIEDADES EN PERCOLADO (M3).....	81
FIGURA 73: SÓLIDOS TOTALES EN TANQUES DE ALIMENTACIÓN	82
FIGURA 74: SÓLIDOS TOTALES EN PERCOLADO	83
FIGURA 75: VOLUMEN DE PERCOLADO	83
FIGURA 76: HUMEDAD EN BARROS-PRECIPITACIONES.....	84
FIGURA 77: HUMEDAD EN BARROS-PRECIPITACIONES	85
FIGURA 78: TEMPERATURAS MÍNIMAS REGISTRADAS DURANTE LA EXPERIENCIA EN AMBAS PLAYAS (2DO ENSAYO).....	86
FIGURA 79: TEMPERATURAS MÁXIMAS REGISTRADAS DURANTE LA 2DA. EXPERIENCIA	86
FIGURA 80: BOXPLOT CORRESPONDIENTE A TEMPERATURAS DIARIAS REGISTRADAS	87
FIGURA 81: VOLUMEN DE PERCOLADO DE AMBAS PLAYAS Y PRECIPITACIONES. (ENSAYO 2).....	88
FIGURA 82: SÓLIDOS TOTALES EN TANQUE DE ALIMENTACIÓN (ENSAYO 2)	89
FIGURA 83: SÓLIDOS TOTALES EN PERCOLADO (ENSAYO 2)	90
FIGURA 84: HUMEDAD EN BARROS (ENSAYO 2).....	91
FIGURA 85: ALTURA DE LOS BARROS (ENSAYO 2).....	92

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace siglos, se conoce que el consumo de grandes dosis de arsénico (As) representa un veneno para el ser humano. Esto se debe a que este elemento es muy tóxico para el organismo, causando en concentraciones elevadas efectos agudos que pueden llegar a ser letales. Su exposición a bajas concentraciones durante periodos prolongados puede producir efectos negativos crónicos para la salud. La EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos), ha declarado al arsénico como cancerígeno Clase A.

Con el paso de los años, se ha trabajado mucho para resolver el problema del As en el agua de bebida, buscando diferentes opciones de tratamiento que permitan reducir el contenido de este elemento. El mayor esfuerzo se ha volcado en cumplir con los límites impuestos por los distintos organismos, sin reparar en el manejo de los residuos que estos tratamientos generan

La mayor parte de los residuos generados durante los procesos de potabilización, son los denominados **lodos o barros** que resultan de la adición y reacción de distintos compuestos químicos.

El tratamiento de barros en plantas de potabilización de aguas es relativamente nuevo, por lo que pocos estudios se han realizado sobre ellos, no contándose con datos precisos de caracterización, producción e impacto ambiental de los mismos.

Existe escasa información bibliográfica específica sobre el diseño de las instalaciones necesarias para su tratamiento y disposición final, especialmente cuando el objetivo es remover arsénico en aguas subterráneas.

Es por ello que, la finalidad de este proyecto fue realizar un estudio de las líneas de deshidratación de barros de plantas de remoción de As por procesos de coagulación-adsorción-filtración, particularmente aquellas que emplean el método ArCis-Unr®, a fin de evaluar su funcionamiento y elaborar recomendaciones para su diseño.

2. OBJETIVOS

- Realizar una investigación bibliográfica sobre la problemática de la presencia del arsénico en el agua de bebida, los procesos de tratamiento disponibles y la generación de barros.
- Realizar una investigación bibliográfica sobre medios naturales de deshidratación de barros con contenidos de arsénico.
- Evaluar el funcionamiento de las líneas de tratamiento en dos plantas que utilizan el Proceso ArCis-Unr®
- Realizar ensayos de laboratorio para simular el funcionamiento de las playas de secado de los barros.
- Realizar ensayos en planta piloto para comparar el funcionamiento de playas cubiertas y descubiertas.

3. GENERALIDADES

El arsénico (As) es un elemento químico, perteneciente a la familia de los metaloides, muy común en rocas, suelo hidrosfera y biósfera, calculándose su presencia en cerca de 5×10^{-4} % de la corteza terrestre siendo un componente de aproximadamente 245 minerales diferentes.

El As puede estar presente en distintos estados de oxidación (-III, 0, III, V) y en formas inorgánicas y orgánicas, en un amplio rango de concentraciones en aire, agua, suelos, vegetales y animales.

Los niveles de As en el ambiente son variables, ya que es un elemento con muy alta movilidad y capacidad de transformación, pudiendo sorberse o desorberse de partículas, cambiar de estado de oxidación al reaccionar con oxígeno u otras moléculas del aire, del agua o del suelo o por acción de microorganismos. La presencia de elevados niveles de As en agua está directamente relacionada con su liberación desde la fase sólida, con fenómenos de transporte y de transferencia a otros medios y procesos de dilución por mezcla.

El arsénico puede encontrarse formando parte de cerca de 200 diferentes minerales, incluyendo arsénico elemental, arseniuros, sulfuros, óxidos, arseniatos y arsenitos. En agua, este metaloide se encuentra en dos estados de oxidación, +3 y +5. La forma trivalente, As (III) se hidroliza como ácido arsenioso, H_3AsO_3 , y está presente como ácido libre o como una de las especies resultantes de su disociación. La forma pentavalente As (V) también se hidroliza como ácido arsénico H_3AsO_4 , y aparece como ácido no disociado o como sus especies disociadas. El ácido arsénico (H_3AsO_4), se disocia casi completamente a $PH > 4$, mientras que el ácido arsenioso H_3AsO_3 muestra disociación sustancial solamente a $PH > 8$.

La especie y la movilidad del As en los suelos es afectada por el pH y por las condiciones redox (potencial redox Eh) del suelo. Ante un alto potencial redox predomina el As (V) y la movilidad es baja. A medida que aumenta el pH y el potencial redox disminuye predomina el As (III). La forma reducida de As está más sujeta a la lixiviación porque tiene mayor movilidad. (*Iberoarsen, 2010*)

En términos generales, bajo condiciones oxidantes, el estado de As (V) predomina sobre el As(III) encontrándose fundamentalmente como $H_2AsSO_4^-$, a valores de pH menores que 6.9; mientras que a pH más alto, la especie dominante es $HAsO_4^{2-}$. En condiciones de extrema acidez, la especie dominante será H_3AsO_4 mientras que, en condiciones de extrema basicidad, la especie dominante será AsO_4^{3-} . En condiciones reductoras, a pH inferior a 9.2, predominará la especie neutra (*Brookins, D. 1988/Yan. X. et al 2000*).

En las aguas subterráneas el As que predomina es el inorgánico, (Arseniato AsO_4^{3-}), pero pueden encontrarse el As en ambos estados de oxidación ya que las concentraciones de As(III) y As(V) dependen de la entrada de As en las condiciones redox y de la actividad biológica. Las formas orgánicas se encuentran en pequeñas proporciones.

Las concentraciones en que usualmente se encuentra el As en las aguas superficiales son de menos de 0.01mg/l, pero se pueden encontrar niveles más altos cerca de industrias, minas y depósitos de minerales.

En el suelo, el As generalmente está presente en formas inorgánicas como arseniato AsO_4^{3-} y arsenito AsO_2^- , que frecuentemente se encuentra adherido al suelo, pero también pueden pasar al agua subterránea. Las concentraciones típicas de la corteza terrestre están en un promedio de 2mg/kg, con valores típicos de 1 a 40 mg/kg, aunque en ciertas zonas pueden encontrarse valores mayores. Los compuestos de As (III) son de 4 a 10 veces más móviles que los compuestos de As (V) (*Fernandez Cirelli et al, 2011*).

4. NORMATIVA VIGENTE

4.1 Límites para el agua de bebida

Debido al riesgo que representa para la salud el consumo de aguas con As, el contenido de este elemento en las bebidas hídricas, agua potable y aguas envasadas se encuentra regulado en el capítulo XII del **Código Alimentario Argentino** en su **artículo 982**. Allí se define:

”Con las denominaciones de Agua Potable de suministro público y Agua Potable de uso domiciliario, se entiende la que es apta para la alimentación y uso doméstico: no deberá contener sustancias o cuerpos extraños de origen biológico, orgánico, inorgánico o radiactivo en tenores tales que la hagan peligrosa para la salud. Deberá presentar sabor agradable y ser prácticamente incolora, inodora, límpida y transparente. El agua potable de uso domiciliario es el agua proveniente de un suministro público, de un pozo o de otra fuente, ubicada en los reservorios o depósitos domiciliarios...”

En cuanto al contenido de As (sustancia inorgánica), la situación es la siguiente:

En el año 2007 mediante la Resolución Conjunta N° 68 y N° 196 de fecha 22 de mayo de 2007 de la SECRETARÍA DE POLÍTICAS, REGULACIÓN Y RELACIONES SANITARIAS del entonces MINISTERIO DE SALUD y de la ex SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, PESCA Y ALIMENTOS del entonces MINISTERIO DE ECONOMÍA Y PRODUCCIÓN, el Código Alimentario Argentino (CAA), en los Artículos 982 y 983 incorporó un valor guía de Arsénico (As) en agua de 10 µg/l (0,01 mg/l) como nivel máximo a lograr en CINCO (5) años en las regiones endémicas.

Posteriormente en el año 2012 mediante Resolución Conjunta N° 34 y N°50 de fecha 16 de febrero de 2012, de la ex SECRETARÍA DE POLÍTICAS, REGULACIÓN E INSTITUTOS del entonces MINISTERIO DE SALUD y la SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y PESCA del entonces MINISTERIO DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y PESCA, se prorrogó el plazo de CINCO (5) años previsto en los Artículos 982 y 983 del C.A.A, para alcanzar el valor de 0,01mg/l de Arsénico en los términos previstos en dichos artículos, hasta contar con los resultados del estudio “Hidroarsenicismo y Saneamiento Básico en la REPÚBLICA ARGENTINA – Estudios básicos para el establecimiento de criterios y prioridades sanitarias en cobertura y calidad de aguas” cuyos términos fueron elaborados por la SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS DEL MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL.

En el año 2019 considerando que el estudio epidemiológico no se había finalizado la Comisión Nacional de Alimentos (CONAL) decidió mantener el límite de 0.01 mg/L incorporando la siguiente consideración:

En aquellas regiones del país con suelos de alto contenido de arsénico, la autoridad sanitaria competente podrá admitir valores mayores a 0,01 mg/L con un límite máximo de 0,05 mg/L cuando la composición normal del agua de la zona y la imposibilidad de aplicar tecnologías de corrección lo hicieran necesario; ello hasta contar con los resultados del estudio “Hidroarsenicismo y Saneamiento Básico en la República Argentina – Estudios básicos para el establecimiento de criterios y prioridades sanitarias en cobertura y calidad de aguas”, cuyos términos fueron elaborados por la Coordinación Políticas Socioambientales de la entonces Secretaría de Gobierno de Salud del entonces Ministerio de Salud y Desarrollo Social y ex Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica del entonces Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda. La Comisión Nacional de Alimentos deberá recomendar el límite máximo admitido para dichas regiones del país en base a los estudios antes referidos.

4.1.1 Normativa existente para residuos con contenido de As

Los residuos sólidos obtenidos durante el tratamiento de agua para remoción de As deben ser tratados y dispuestos de forma segura, por lo que es necesario conocer si son o no peligrosos.

En Argentina la regulación y disposición de los residuos peligrosos está dada por la **Ley N°24.051**. La misma está regulada según el **decreto 831/93**.

En el anexo I de dicha normativa se define como barro a "*cualquier residuo sólido, semisólido, o líquido generado en una planta de tratamiento de aguas residuales, sea municipal, provincial o nacional o industria, planta de purificación de agua para consumo, o instalación de control de contaminación de efluentes*".

La mencionada ley para residuos peligrosos, establece que deben someterse a control desechos que tengan ciertos elementos entre los que se encuentran el arsénico.

Según el **Anexo IV** del decreto 831/93, la identificación de un residuo como peligroso debe realizarse a partir de dos procedimientos:

- Mediante listados (en este listado se identifican qué elementos deben considerarse en el residuo para someterlo a control)

Si se encuentra presente en uno de los siguientes listados:

- a) Lista de elementos o compuestos potencialmente peligrosos
 - b) Lista de industria y/o procesos con alta posibilidad de producir residuos que contengan compuestos peligrosos
- En base a las características de riesgo. Si cumple con una o más de las características enumeradas en la reglamentación entre las cuales se encuentra:

Lixiviabilidad: Con estas características se identifican a aquellos residuos que, en caso de ser dispuestos en condiciones no apropiadas, pueden originar lixiviados donde los constituyentes nocivos de dichos residuos alcancen concentraciones tóxicas.

Dentro de los parámetros cuyas concentraciones se deben determinar en el lixiviado se encuentra el arsénico.

En este mismo anexo, se establecen los límites para los parámetros químicos de los barros. Los barros destinados al relleno sanitario con residuos sólidos domésticos, se dispondrán en celdas separadas, respetando los límites correspondientes a los parámetros químicos preestablecidos. A continuación se describe el límite establecido para el As:

- **Arsénico:** Este parámetro se determinará sobre el lixiviado resultante de someter una muestra del barro al Procedimiento de Extracción. Esta prueba tiene como objeto tratar de reproducir la condición más adversa a que se vería expuesto el barro en el relleno, y por tanto medir la cantidad del contaminante en estudio que pasaría al lixiviado eventualmente. Para el arsénico en el lixiviado se adopta un límite máximo de **1 mg/l** que resulte de adoptar el criterio de la U. S. EPA de fija dicha concentración como 100 veces el criterio de calidad de aguas. En este caso se toma como criterio de calidad **0,01 mg/l**.

5. TECNOLOGÍAS PARA REMOCIÓN DE AS: INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Desde el punto de vista técnico, la selección del método dependerá en gran medida de la especiación del arsénico, la composición química del agua, el potencial de reducción, la dureza, la presencia de sílice,

sulfatos, fosfato, hierro y otras especies químicas, los volúmenes a ser tratados y el grado de sofisticación que pueda ser aplicado. Adicionalmente, debe tenerse en cuenta la manipulación y disposición final de los residuos generados. (Iberoarsen, 2010)

Actualmente se conocen alrededor de 14 tecnologías para el abatimiento del As, clasificadas como convencionales y emergentes, las cuales tienen eficiencia que va desde el 70% hasta el 99% y en general, son tecnologías que suelen cubrir a centros urbanos. (Crisanto, 2012)

Todas las tecnologías se basan en unos pocos procesos químicos básicos, aplicados simultáneamente o secuencialmente: oxidación/reducción, precipitación, adsorción e intercambio iónico, separación sólido/líquido, exclusión física, etc. Generalmente, la especie más fácilmente eliminable es la forma pentavalente, y la mayoría de las tecnologías consideran un tratamiento oxidativo previo para el As (III) (Iberoarsen, 2010)

5.1 Tecnologías convencionales

5.1.1 Oxidación-Reducción

La mayoría de las tecnologías de remoción de As son eficientes cuando el elemento está presente en el estado pentavalente, porque la forma trivalente no está cargada a pH debajo de 9.2. Por ello, deben oxidarse previamente los componentes arsenicales.

El arsenito puede oxidarse directamente por un número de agentes químicos como el cloro gaseoso, el hipoclorito, ozono, permanganato, peróxido de hidrógeno, óxidos de manganeso y el reactivo Fentón (H₂O₂/Fe²⁺). El cloro es un oxidante rápido y efectivo, pero puede conducir a reacciones con la materia orgánica, produciendo trihalometanos tóxicos como subproductos. En Europa y en los EEUU se usa crecientemente el ozono en reemplazo del cloro. El permanganato de potasio (KMnO₄) es un oxidante efectivo del arsenito y es un reactivo comúnmente disponible en los países en desarrollo. El agua oxigenada puede ser un oxidante efectivo si el agua contiene altos niveles de hierro disuelto, lo cual ocurre a menudo conjuntamente con la contaminación arsenical, se producen entonces reacciones de tipo Fentón. También, la irradiación ultravioleta sola o conjuntamente con TiO₂ pueden ser opciones convenientes para la oxidación del As (III). (Iberoarsen, 2010).

5.1.2 Coagulación y filtración

La tecnología convencional de coagulación-filtración es una metodología de tratamiento de aguas común empleada para remover sólidos suspendidos y coloidales en el agua cruda. El proceso de coagulación promueve la agregación de sólidos suspendidos para formar flocs, que pueden ser removidos a través de sedimentación y/o filtración (EPA 2000).

En esta tecnología el material suspendido o en forma coloidal se transforma resultando en partículas sedimentables por gravedad o posibles de ser filtradas (Crisanto, 2012).

En el ítem 2.4 se describirá en detalle el Proceso ArCIS-UNR®, que es una tecnología convencional que emplea coagulación-adsorción-filtración para la remoción de As, desarrollada en el CIS- FCEIA-UNR.

5.1.3 Ablandamiento con cal

Es un proceso similar al de coagulación-filtración, que consiste en la transformación de piedra caliza en presencia de agua y ácido carbónico para formar carbonato de calcio; este compuesto adsorbe entonces el arsénico y el proceso continúa por coagulación. El método se emplea usualmente para tratar aguas muy duras y presenta alta eficiencia. Una de las desventajas que presenta este método es el elevado pH en las aguas resultante, alrededor de 10-12 como así también la necesidad de dosis muy altas de coagulante. De todos modos, es bastante difícil que el contenido de As se lleve a niveles por debajo de 1mg/L, por lo que puede necesitarse un tratamiento secundario. El ablandamiento con cal es más efectivo cuando el pH es alto (>10.5) (*Iberoarsen, 2010*).

5.1.4 Adsorción y precipitación

El As puede ser fuertemente atraído a los sitios de sorción sobre la superficie de varios materiales sólidos y el proceso puede usarse para remover efectivamente As de la solución. Pueden usarse óxidos de aluminio (alúmina activada), óxidos/hidróxidos de hierro (como hidróxidos de hierro granular (GFH)), dióxido de titanio. A continuación, se describen los adsorbentes más empleados: (*Iberoarsen, 2010*)

5.1.4.1 Remoción de As empleando óxidos

Se ha encontrado una muy buena eficiencia con el empleo de materiales de base de óxido e hidróxido de hierro y se han desarrollado varios productos diferentes, entre ellos el óxido de hierro granular y, especialmente, el hidróxido de hierro granular (GFH®, granular iron hydroxide). El GFH® retiene fuertemente aniones arseniato que son, por lo tanto, inmovilizados si están a baja concentración en el agua a ser tratada. Una ventaja adicional es que también se remueven efectivamente especies de As (III), probablemente debido a la oxidación a As (V) en la superficie. Otro material que también ha sido aplicado con éxito es el óxido férrico granular (Bayoxide® GFO), con alrededor de 70% de Fe_2O_3 , y una superficie específica de 120-200 m^2/g .

Por su parte, el óxido de cerio ofrece una alta selectividad para las especies arsenicales. Con esta idea se ha desarrollado un adsorbente que puede ser aplicado a la sorción de especies arsenicales, pero también para fosfato, fluoruro y borato (*Iberoarsen, 2010*).

El uso de dióxido de manganeso MnO_2 también ha demostrado una eliminación efectiva de especies de arsénico.

Todos los materiales mencionados, no se regeneran, si no que se desechan cuando se han agotado y deben ser sustituidos (*Iberoarsen, 2010*).

5.1.4.2 Alúmina activada

La alúmina activada se fabrica calcinando una alúmina hidratada. Estas alúminas poseen una superficie interna en el rango de 200 a 300 m²/g, bajos grados de cristalización y grandes volúmenes de poro con una distribución de tamaños de poro definida (Crisanto, 2012).

La alúmina activa usada típicamente en el tratamiento de agua es una mezcla de óxidos de aluminio amorfo y gama (γ -Al₂O₃), preparada para calcinación de hidróxido de aluminio (Al(OH)₃), a temperaturas entre 300 y 600°C. (Crisanto, 2012).

La alúmina activada muestra preferencia por los iones de acuerdo a la siguiente serie de selectividad:

OH⁻>>HPO₄²⁻>HAsO₄²⁻>F⁻>SO₄²⁻>>HCO₃⁻>Cl⁻>NO₃⁻

Es por ello que las especies de arseniato se pueden tratar muy bien, y la disminución significativa de la capacidad de adsorción se atribuye solamente a la presencia de fosfato, ya que la adsorción competitiva de iones sulfato es menos eficiente. Se puede regenerar el material mediante soluciones de NaOH seguidas de descargas con ácido para restablecer la carga superficial positiva. La regeneración es más difícil y menos efectiva comparada con intercambiadores de resinas iónicas, y conduce a la remoción de solamente 50-80% de las especies de arsénico. La desventaja que presenta este método es que se incluyen un rango de pH relativamente estrecho y las dificultades de regeneración del material (Iberoarsen, 2010).

5.2 Procesos de membranas

Los procesos de membranas ofrecen excelentes posibilidades para la remoción de arsénico.

En función del peso molecular o del tamaño de partículas, es posible la aplicación de membranas de diferentes estructuras y tamaños de poro para la reducción o eliminación de contaminantes presentes en soluciones acuosas de forma más o menos selectiva.

El desarrollo alcanzado en la tecnología de membranas permite hoy clasificarlas de acuerdo a la capacidad de separación en los procesos que se describirán a continuación:

5.2.1 Nanofiltración (NF)

También llamada ósmosis inversa a baja presión o ablandamiento por membranas, relaciona la osmosis inversa (OI) y la UF (ultrafiltración) en términos de selectividad de la membrana, la cual está diseñada para reducir la concentración de iones polivalentes (calcio y magnesio) en operaciones de ablandamiento. Más recientemente la NF ha sido empleada para eliminar o separar la materia orgánica. La nanofiltración usa elementos filtrantes con poros de tamaño entre 10 y 100 Å y las presiones trabajan entre 5 y 15 bares. Permite la remoción de sólidos en suspensión, iones polivalentes y sustancias orgánicas de alto peso molecular como los azúcares. En esta técnica, los iones monovalentes son rechazados débilmente por la membrana. Dado que la NF utiliza membranas de alta presión, tienen el tamaño adecuado de poros para impedir que las especies de As que son muy pequeñas atraviesen las membranas (RSA-CONICET, 2018).

5.2.2 Ultrafiltración (UF)

En el tratamiento de aguas, la ultrafiltración (UF) es una operación de clarificación y desinfección mediante el uso de una membrana. Las membranas empleadas en este caso son porosas, con diámetros de poro

entre 30 a 100Å, permitiendo solo el rechazo de solutos gruesos (macromoléculas) y de todo tipo de microorganismos como virus y bacterias. Debido a que los solutos de bajo peso molecular no son retenidos por la UF, la contrapresión osmótica puede ser despreciada, y la presión de trabajo puede mantenerse baja (0.50 a 5 bares)

5.2.3 Microfiltración (MF)

La diferencia fundamental que existe entre la MF y la UF es el tamaño del poro de la membrana que se encuentran entre 10^3 y 10^4 Å. Este tipo de operación se aplica primariamente a la remoción de partículas (clarificación).

Las presiones son similares a las empleadas en UF. La microfiltración puede utilizarse en lugar de una filtración convencional con arena y puede utilizarse para remover arsénico con un tratamiento previo de coagulación.

5.2.4 Osmosis inversa (OI)

Si se coloca agua pura en un recipiente y en otro compartimento del mismo se coloca una solución salina, separándolas mediante una membrana semipermeable adecuada, se producirá un pasaje espontáneo de agua pura a través de la membrana debido a la diferencia de potenciales químicos entre ambas soluciones. Este pasaje de agua diluye la solución salina, intentando equilibrar los potenciales químicos de ambas soluciones. Este fenómeno es conocido como ósmosis, y la presión que se genera por el incremento de la columna hidrostática en el compartimento de la solución concentrada se denomina presión osmótica.

Utilizando membranas semipermeables adecuadas, es posible invertir el proceso de ósmosis natural. Para que esto ocurra es necesario aplicar en el compartimento de la solución concentrada una presión externa mayor que la presión osmótica natural de esa solución concentrada en sales. De esta forma se invierte el sentido del flujo a través de la membrana obligando a que el solvente de la solución salina pase al compartimento de la solución diluida.

Las membranas empleadas poseen innumerables poros submicrónicos, cuyos diámetros suelen variar entre 5 y 20 Å. La presión a ser aplicada deberá superar la presión osmótica de la solución salina considerada. Las membranas comúnmente utilizadas rechazan especialmente los iones polivalentes, siendo apropiadas para oxaniones de As. El proceso es eficiente en un amplio rango de pH (3-11) (RSA-CONICET, 2018).

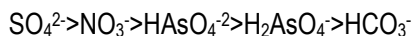
Al igual que la NF, la OI emplea membranas de alta presión (5 a 15 bares) con un tamaño de poro adecuado que le permite eliminar las partículas de As que son muy pequeñas.

La OI es una tecnología desalinizadora no específica, que permite la remoción de As con más de un 95% de eficiencia.

5.2.5 Resinas de intercambio iónico

En este proceso, el contaminante se intercambia con otros iones en una resina, generalmente de matriz polimérica a la cual se le unen grupos funcionales cargados (por ej. Aminas cuaternarias). Para la remoción de As existen resinas de intercambio iónico fuertemente básicas en forma de cloruro, que se encuentran comercialmente disponibles. Pueden aplicarse resinas de intercambio iónico sintéticas, generalmente de matriz polimérica (poliestireno entrecruzado con divinilbenceno), unidas a grupos funcionales cargados. Para el As se han usado grupos amino cuaternarios, $N^+ (CH_3)_3$. El arseniato puede ser eliminado efectivamente, produciendo efluentes con menos de $1\mu\text{g/L}$ de arsénico. El arsenito, al no tener carga, no se remueve, y se necesita un paso de oxidación previa.

La regeneración de las resinas se realiza por medio de soluciones NaCl. La capacidad de intercambio efectivo de estas resinas depende principalmente de la composición del agua partida y de la influencia de la adsorción competitiva de otros aniones contenidos en el agua. La adsorción relativa sigue las llamadas series de selectividad. Para las resinas fuertemente básicas, y aniones comunes, se encontró la serie siguiente:



En consecuencia, las especies de arseniato serán eliminadas con facilidad, aunque existe fuerte interferencia de sulfato y de nitrato. La eliminación de arseniato es posible solamente a concentraciones de sulfato por debajo de 50mg/L, en las cuales se pueden conseguir tratar 750 volúmenes de lecho entre dos regeneradores. A concentraciones más altas, los ciclos se vuelven muy cortos para una eliminación económica. Si en el agua de partida existe As (III), se necesita una oxidación antes de la etapa de intercambio iónico.

5.3 Tecnologías emergentes

Los métodos convencionales a menudo no son económicamente viables para la remoción de As en zonas de bajos recursos, y en las últimas décadas una gran cantidad de trabajo científico y tecnológico apuntó a desarrollar nuevas tecnologías para la remediación de arsénico que buscan minimizar costos de inversión, operación y mantenimiento y el desarrollo tecnológico.

Algunas de estas tecnologías son meramente la adaptación de métodos convencionales como coagulación y filtración, o adsorción con el uso de materiales muy económicos como ser: arena recubierta con hierro, ladrillos, limaduras o granalla de hierro, alúmina activada y carbón. Generalmente estos métodos se emplean a escala doméstica, para proveer agua segura a nivel familiar.

Dentro de las tecnologías emergentes podemos mencionar:

5.3.1 Remediación in situ

Se han realizado propuestas del uso de barreras permeables reactivas y zonas reactivas como tecnologías muy eficientes para la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos, particularmente As de aguas subterráneas. Las barreras utilizan materiales que contienen óxido de hierro o de aluminio en altas concentraciones y se instalan en las napas que contienen arsénico antes de ser extraídas.

5.3.2 Materiales geológicos como adsorbentes naturales

La adición de óxidos minerales a pequeños volúmenes de agua para la inmovilización de arsénico puede ser un proceso posible para países en desarrollo. Se han investigado un número de minerales y suelos, incluyendo un oxisol enriquecido en Al y Fe, gibbsita, y muestras de minerales enriquecidos de Mn y Fe.

La laterita, un suelo ácido compuesto por óxidos de hierro y aluminio, y menores proporciones de manganeso y titanio, ha probado ser un material promisorio de bajo costo para altos contenidos de As en agua de bebida.

5.4 Remoción de As por procesos de coagulación-adsorción-filtración: Proceso ArCIS-UNR®

Esta metodología fue desarrollada por el Centro de Ingeniería Sanitaria, a partir de la necesidad de tratar aguas subterráneas de algunas zonas de la provincia de Santa Fe, con concentraciones de As elevadas (entre 50 y 300 µg/L) asociadas en muchos casos con fluoruros en concentraciones del orden de 2.00 a 2.50 mg/L.

Una característica importante a destacar es que las aguas subterráneas de esta zona presentan concentraciones de sílice disuelta del orden de los 55-60mg/L como SiO₂. Los silicatos disueltos interfieren en la mayoría de los procesos de tratamiento basados en procesos de adsorción por que compiten por los sitios activos. También constituyen un problema en las plantas de ósmosis inversa, ya que su precipitación sobre las membranas las inutiliza y por lo tanto, deben utilizarse productos antiescalantes para proteger a las mismas.

Debido a estas particularidades que presentan las aguas subterráneas de la provincia de Santa Fe, se precisaba desarrollar un proceso de tratamiento que permitiera remover simultáneamente arsénico y fluoruros aplicable en aquellos casos que el contenido total de sales es bajo.

Este método fue diseñado partir de ensayos a escala laboratorio y planta piloto con el fin de encontrar un coagulante que permitiese una eficiente remoción simultánea de Arsénico y Flúor, así como también evaluar el proceso de pre-filtración gruesa ascendente seguido de filtración rápida como método apropiado para la separación de los flocs formados utilizando el coagulante seleccionado.

El proceso se inicia con la captación de agua subterránea desde los pozos de extracción. El agua extraída es enviada a una cisterna de compensación, donde mediante bombas de dosificación se añaden en primera instancia hipoclorito de sodio (NaClO) para asegurar que el As se encuentre como As (V), luego ácido sulfúrico (H₂SO₄) con el fin de llevar el PH a valores de 6,9 y por último se agrega el coagulante que es el policloruro de aluminio (PAC).

Luego, esta mezcla pasa por el filtro ascendente, formado por grava de cierta granulometría. Al salir el agua del filtro pasa por un filtro de arena cuya granulometría es de 0,6mm. El líquido que sale de este último filtro es acopiado en un tanque de distribución para luego ser distribuido a la red. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el esquema del proceso ArCIS-UNR®.

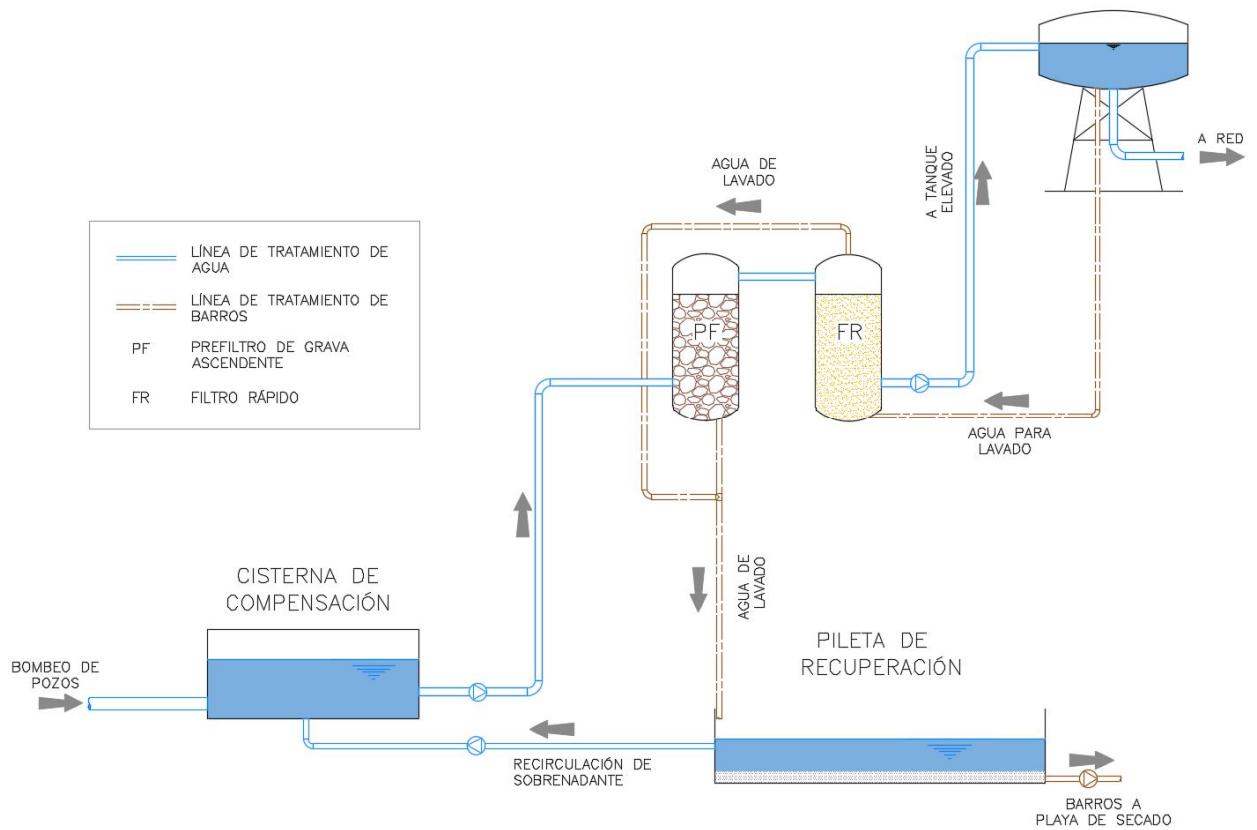


FIGURA 1: ESQUEMA DEL PROCESO ARCIS-UNR®

Los filtros deben ser sometidos a procesos de lavado cuyas aguas son enviadas hacia una piletta de recuperación donde sedimentan los sólidos y el sobrenadante es recirculado a la planta de tratamiento.

Los barros son enviados hacia playas de secado o lagunas de secado. Allí permanecen durante algún tiempo con el objetivo de disminuir su humedad y su volumen, a fin de alcanzar una consistencia tal que permita su fácil traslado.

A continuación en la **Figura 2** puede verse el esquema de funcionamiento de la línea de tratamiento de barros.

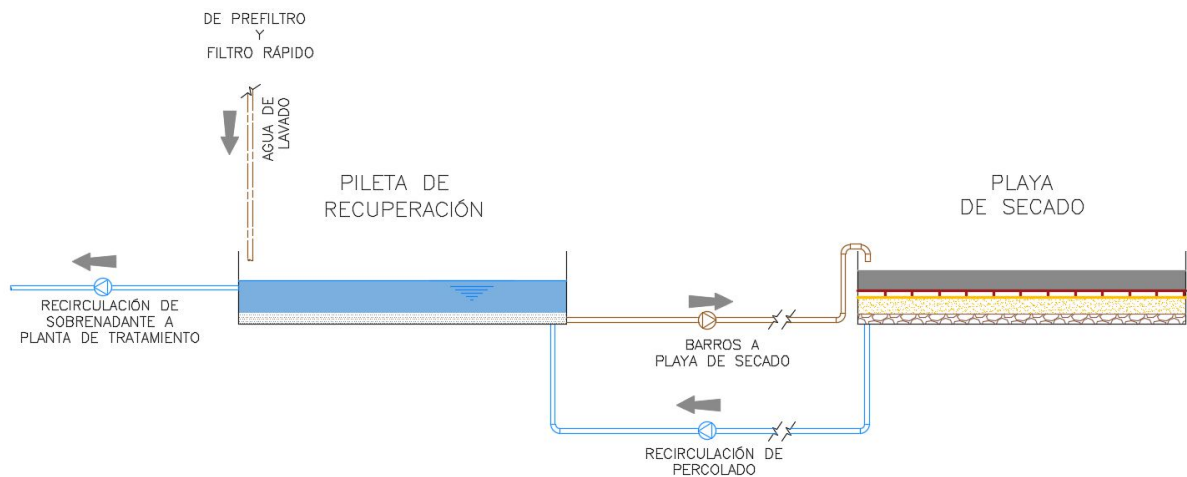


FIGURA 2: LÍNEA DE TRATAMIENTO DE BARROS

En la **Figura 3** se observa la estructura de las playas de secado formada por un manto sostén de grava, una manto filtrante de arena y en la parte superior un doblado de ladrillos con una separación de 2cm. Además posee en la parte inferior un dren que permite el percolado.

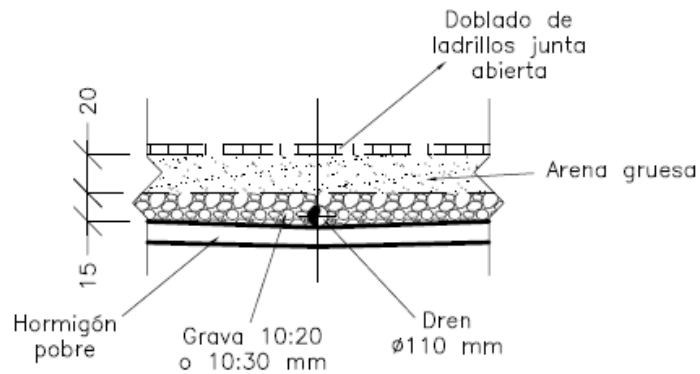


FIGURA 3: ESTRUCTURA DE LAS PLAYAS DE SECADO

Este método de deshidratación de barros, es un método natural que permite el secado a través de la evaporación y también por percolado. Una de las desventajas que presenta es la necesidad de grandes superficies para la construcción de las playas, siendo adecuado para pequeñas y medianas poblaciones.

Cabe destacar, que los parámetros de diseño para playas de secado que se proponen en la bibliografía existente no son específicos para efluentes con contenido de As.

Es por ello que a través del presente trabajo, se pretende caracterizar los barros provenientes de plantas en operación que utilicen el Proceso ArCIS-UNR® a fin de determinar características físico-químicas y volúmenes generados así como también definir parámetros de diseño para las instalaciones de deshidratación en playas desecado.

6. RESIDUOS GENERADOS EN PLANTAS DE REMOCIÓN DE As

Los residuos generados en las plantas de tratamiento de agua para remoción de As pueden clasificarse en tres grandes categorías:

- **Barros:** Los procesos de sedimentación, coagulación y lavado de filtros, ablandamiento con cal y remoción de hierro y manganeso, generan barros.
- **Concentrados/salmuera:** Líquidos generados a partir del rechazo de agua en los procesos de membranas, agua de rechazo en plantas de electrodiálisis.
- **Regenerantes:** Líquidos utilizados para recuperar la capacidad de adsorción de medios específicos como la alúmina activada

Las características químicas y contaminantes del residuo son quienes determinan la disposición final del mismo. Es razonable esperar que como resultado de la fijación de normas más estrictas para la calidad del agua de bebida que requieren eficiencias de remoción más elevadas afectarán directamente la composición de los residuos.

En la tabla siguiente se presentan los distintos procesos de tratamiento y los residuos que se generan.

TABLA 1: TIPOS DE TRATAMIENTOS Y LOS RESIDUOS QUE SE GENERAN (CRISANTO 2012)

TIPO DE TRATAMIENTO	RESIDUO		
	Estado	Composición	Otro/s
Coagulación-adsorción-filtración	Semilíquido	$\text{Fe}(\text{H}_2\text{AsO}_4)_3 / \text{Al}(\text{H}_2\text{AsO}_4)_3$	-
Alumina activada	Residuo líquido	Sales Na_2HAsO_4 y H_3AsO_4 . Barro rico en As	Alúmina (*)
Ablandamiento con cal	Sólido (Barros)	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{AsO}_4)_2$ o $\text{Ca}(\text{AsO}_4)_2$	-
Nanofiltración y Osmosis Inversa	Líquido	Sales Na_2HAsO_4 y H_3AsO_4	Membrana(*)
Resinas de intercambio iónico	Líquidos y sólidos	Sales Na_2HAsO_4 y H_3AsO_5 / Barro rico en As	Resina(*)
Adsorción y precipitación	Semilíquido/Sólido	Hidróxidos $\text{Fe}(\text{H}_2\text{AsO}_4)_3$	Adsorbente(*)

(*)Este residuo se genera una vez que se cumple con la vida útil del mismo.

Los residuos de la coagulación/floculación, son generados principalmente en los decantadores y/o en los filtros, cuya concentración de As es directamente proporcional al volumen de agua tratada, volumen de agua usada en el lavado de filtros, dosis de coagulante y eficiencia alcanzada en la remoción (Iberoarsen, 2010.) Estos residuos, son semilíquidos muy diluidos con aproximadamente un 2% de sólidos. Por la humedad del residuo, uno de los objetivos de tratarlos es reducir su volumen para que estos puedan ser dispuestos de modo adecuado, disminuyendo los costos de transporte, disposición final y obviamente los riesgos de contaminación de medio ambiente (Aloyso G de Souza et.al., 1999).

6.1 Caracterización de los residuos generados en las plantas de remoción de As por procesos de coagulación-floculación-adsorción-filtración

Para poder evaluar las distintas alternativas de tratamiento y disposición de los residuos, es necesario conocer las características del mismo. A continuación se describen los distintos ensayos que deben ser aplicados, con el fin de caracterizarlos.

6.1.1 Sólidos totales

El término sólidos totales es aplicado al material residual en un recipiente luego de la evaporación de una muestra y su posterior secado en horno a una temperatura definida. Los sólidos totales incluyen sólidos totales en suspensión (la porción de sólidos retenida por un filtro) y los sólidos disueltos que pasan a través del filtro.

Los sólidos totales pueden determinarse empleando el método descrito en SM 2540 C¹; secado a 180 °C. Sobre una cápsula de porcelana previamente tarada, se introducen 100 mL de la muestra y se la calienta a baño maría hasta evaporación completa, luego el secado se continúa en estufa a 180 °C hasta pesada constante.

6.1.2 Sólidos sedimentables: CONO IMHOFF

Es un ensayo que permite medir la cantidad de sólidos sedimentables presentes en las aguas residuales, concentrados etc.

El procedimiento consiste en colocar 1 litro del material sedimentable en un cono graduado (cono Imhoff, ver

), La parte de sólidos en suspensión que por tamaño y peso pueden sedimentar en el cono a través del tiempo se denomina material sedimentable.

Se procede a medir el volumen de sólidos que sedimentan a los 30, 60, 90 y 120 minutos. Las mediciones se realizan en ml/l indicando el volumen de sólidos sedimentables separados en función del tiempo.



¹ SM: Según "Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 22nd Ed. 2012. AWWA"

6.1.3 Sólidos en suspensión:

Se filtra al vacío un volumen conocido de muestra con papel de fibra de vidrio, previamente pesado, se seca a 103-105 °C y se pesa (hasta pesada constante). La diferencia de peso obtenida expresada en mg/L representa los sólidos en suspensión totales.

Se calcina luego el filtro en mufla a 600 °C durante 15 minutos se deja enfriar, se pesa y se obtienen los sólidos suspendidos fijos. Los sólidos suspendidos volátiles se obtienen por diferencia entre los sólidos totales en suspensión y los sólidos fijos en suspensión.

6.1.4 Determinación de contenido de humedad:

La forma tradicional de determinar el contenido de humedad, consiste en el secado en horno de la muestra, donde la humedad será expresada en porcentaje como la relación entre el peso de agua existente en una determinada muestra y el peso de las partículas sólidas. Esto puede expresarse como:

$$w = (w_w/w_s) * 100$$

Donde:

w= contenido de humedad en %

w_w= peso del agua contenido en la muestra de sólidos

w_s= peso de las partículas sólidas

6.1.5 Toxicidad:

Uno de los procedimientos que se emplean para evaluar la toxicidad de los residuos es el denominado TCLP (Toxicity Characteristic Leachate Procedure), desarrollado a fines de la década del 80 por la US EPA (método 1311), que evalúa las características tóxicas y cuantifica la posibilidad de extracción de contaminantes bajo un conjunto de condiciones de laboratorio a partir de residuos sólidos. El TCLP puede usarse para la clasificación de residuos que contienen metales, compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles y/o para la predicción de calidad de un percolado. El ensayo consiste en poner en contacto el residuo con una solución de H₂SO₄ y HNO₃ a temperatura y agitación controlada. El extracto líquido obtenido después de la lixiviación es analizado para determinar si presentan cualquiera de los elementos considerados como peligrosos (As, Ba, Cd, Cr, Pb, Hg, Se y Ag).

Para el caso particular del As, se considera al residuo como peligroso si el extracto posee un contenido de As superior a 1mg/L. Este valor se corresponde a 100 veces el máximo límite contaminante (MCL) para el agua de bebida. En este caso el MCL adoptado de As es de 10µg/L, por lo que se admite en el residuo un máximo de 100x10µg/L. Es por ello que si se modifica el MCL, afectará directamente al límite de As admitido en el residuo. (Decreto 831/93, reglamentación de la Ley N°24.051: "Residuos peligrosos, generación, manipulación, transporte y tratamiento").

Algunos autores (C.H. Itte, 2001) critican el TCLP, sosteniendo que subestima el percolado de residuos altamente alcalinos como los originados en las plantas de ablandamiento con cal debido al efecto de buffer de los mismos

Así mismo, la capacidad de actuar como agente quelante de algunos residuos es subestimado por el TCLP debido a la baja actividad quelante del ácido acético empleado como buffer. Además, el TCLP no tiene en

cuenta el proceso de óxido- reducción que ocurre en los rellenos sanitarios de residuos domésticos urbanos, donde suelen disponerse los barros de las plantas de agua potable. Este es el aspecto más relevante pues el As es más soluble en condiciones reducidas.

Por lo mencionado anteriormente en el estado de California se desarrolló, en el año 1980, un procedimiento alternativo al TCLP, el denominado WET (Waste Extraction Test). Este test, es más agresivo debido a la manera de extraer el lixiviado, tiene un período más prolongado de mezcla y una mayor relación entre la muestra y el fluido a extraer.

A continuación se muestran en la Tabla 2 las diferencias entre el TCLP y el California WET:

TABLA 2: DIFERENCIAS ENTRE EL TCLP Y EL CALIFORNIA WET

CALIFORNIA WET	TCLP
Usa un único fluido para extracción: Buffer Ácido cítrico pH 5.00	El fluido de extracción depende del pH de la muestra: a-Buffer de acetato para pH 4.93 b- Solución de Ácido acético para pH 2.88
Relación entre la muestra y el fluido a extraer 1:10	Relación entre la muestra y el fluido a extraer 1:20
No se especifica el diseño del recipiente de extracción	Se requiere un botella de extracción de vidrio o polipropileno
Se requiere el uso de membranas de 0.45µm para filtrar la muestra luego de la extracción	Se requiere el uso de un filtro de fibra de vidrio de 0.60 a 0.80 µm luego de la extracción
Se utiliza un agitador mecánico	Se requiere un movimiento rotatorio de extremo a extremo a 30rpm
Periodo de extracción 48hs	Periodo de extracción 18 hs
No necesita digestión ácida luego de extraer los metales	Requiere digestión ácida luego de la extracción de metales

El método California WET emplea ácido cítrico que es un fuerte agente quelante, lo que permite extraer mayor cantidad de metales pesados. En estudios previos (*C.H. Itle, 2001*) el WET ha llegado a extraer desde 2 a 10 veces más As que el TCLP, incluso luego de haber multiplicado por 2 el resultado del TCLP debido a la diferente dilución.

7. TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS/SÓLIDOS: ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

Como fue mencionado anteriormente, los residuos generados en las plantas de tratamiento de aguas poseen un gran contenido de humedad, generalmente mayor al 95%. Es por ello que uno de los objetivos de tratar estos residuos es reducir su volumen, para que el mismo pueda ser dispuesto de manera adecuada, disminuyendo los costos de transporte, disposición final y los riesgos de contaminación al medio ambiente. La reducción del contenido de humedad se lleva a cabo en dos etapas, una primer etapa de espesamiento seguida de un proceso de deshidratación.

7.1 *Espesamiento de lodos*

La operación de espesamiento de lodo generalmente se realiza en unidades específicas. El lodo, formado por sales de hierro o aluminio, recibe una pequeña dosis de (0.1 a 1.00 g/kg de sólidos secos contenido en el lodo) de polímeros sintéticos, resultando en eficiencias de espesamiento significativamente mayores.

El espesamiento de lodos presenta una importancia técnica y económica significativa en los sistemas de tratamiento y disposición final de lodos pues la reducción del volumen del lodo permite que las unidades de deshidratación finales tengan un tamaño menor. Además de esto, algunos de estos equipamientos operan de forma más eficiente cuando son alimentados con lodos más concentrados (Aloysio G. de Souza et al., 1999).

Mediante el espesamiento de los barros se consigue una reducción del volumen del lodo en rango de entre un 30 a 80% previo al proceso de deshidratación.

Los tipos de espesamiento de lodos más comunes son los espesadores por gravedad (sedimentadores) y por flotación.

7.1.1 *Espesadores a gravedad*

El espesamiento en plantas de tratamiento de aguas se realiza generalmente en espesadores a gravedad, los cuales funcionan cuando la gravedad específica de los sólidos es mayor a 1. La alimentación de los espesadores puede realizarse ya sea por batch o de manera continua.

En general, se adoptan tanques de hormigón, circulares, como unidades de espesamiento aunque algunos pequeños tanques pueden ser de acero. Están típicamente provistos de barredores de fondo que permiten la remoción de sólidos. La losa de fondo posee una forma cónica con una pendiente de entre un 10 a un 20%, la cual permite que se concentren los sólidos en una tolva de descarga.

Los residuos provenientes tanto de las unidades de clarificación como del lavado de los filtros, pueden espesarse únicamente de un 1 a un 3% en cargas de 19.50 kg/m².día.

En el caso de espesadores de alimentación continua, el barro ingresa desde el centro del espesador distribuyéndose radialmente de forma equilibrada y depositándose los sólidos en el fondo de la unidad. El sobrenadante clarificado es retirado por medio de vertederos periféricos, que descargan finalmente en una canaleta ubicada a lo largo de todo el perímetro del espesador.

El barro espesado en el fondo es retirado de forma continua. En general los espesadores se encuentran equipados con raspadores de fondo, los cuales lentamente desplazan el lodo sedimentado en dirección al centro del tanque, para luego ser retirado (J. Rusell, et al., 1996).

En el caso de espesadores de alimentación por batch, se adoptan por lo menos dos unidades en paralelo. La zona más próxima al fondo de cada unidad se utiliza como depósito del lodo espesado. Cada unidad es alimentada esporádicamente con lodo proveniente de los sedimentadores, hasta que el tanque alcanza su capacidad. Luego de un cierto período de permanencia, un dispositivo telescópico es accionado para el descarte del sobrenadante hasta alcanzar un nivel predeterminado en el tanque. El nivel del dispositivo puede ser modificado las veces que sea necesario a medida que los sólidos sedimentan, hasta alcanzar el nivel de espesamiento deseado. En las **Figura 5** y **Figura 6** se muestra un esquema tipo de un espesador de lodos a gravedad. (M. Antonio et.all., 1999)

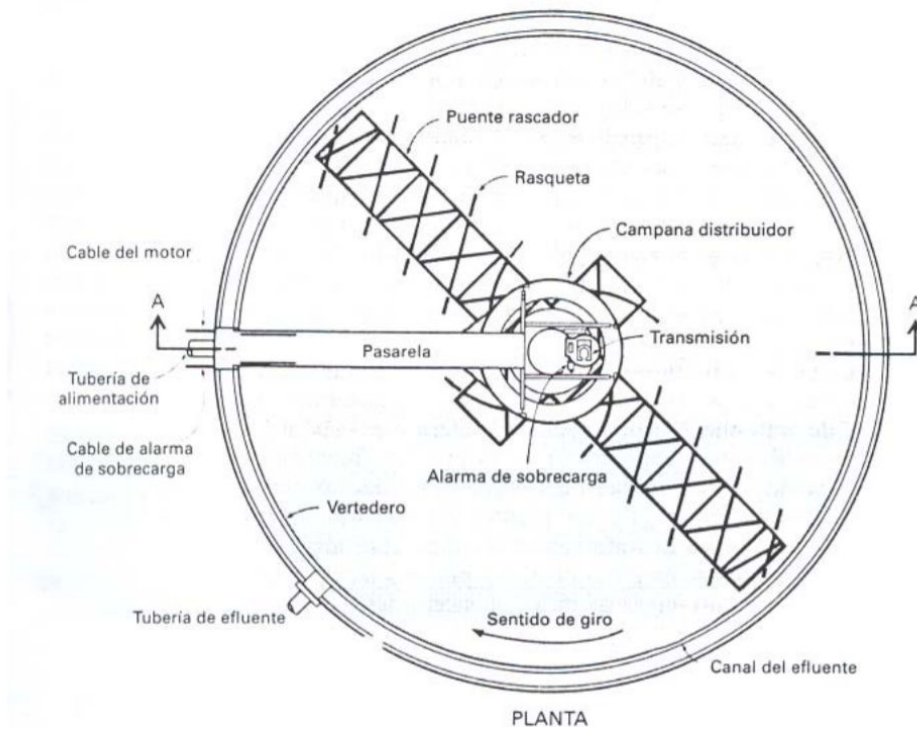


FIGURA 5: ESPESADOR A GRAVEDAD-PLANTA

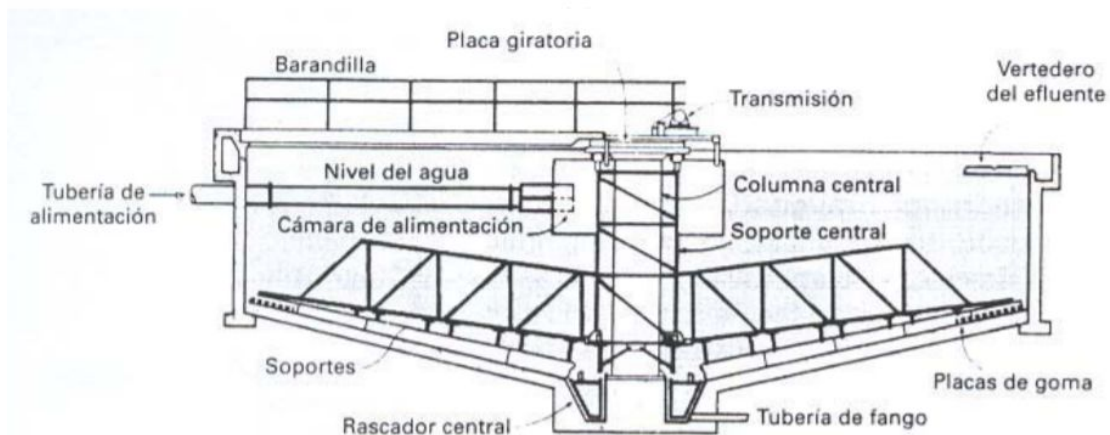


FIGURA 6: ESPESADOR A GRAVEDAD-CORTE. FUENTE: UNIVERSIDAD DE CORUÑA (TECNOLOGÍAS DE ESPESAMIENTO (FT-FNG-001), SUAREZ LÓPEZ;ET AL)

7.2 Métodos mecánicos de deshidratación de barros

Diversos equipos se encuentran disponibles para la deshidratación de residuos provenientes de plantas de tratamiento de aguas.

Sin embargo, solo cinco tipos se encuentran actualmente en uso: centrífugas, filtro prensa de plato y marco, filtro prensa de diafragma, filtro prensa de banda y filtros al vacío.

Los filtros al vacío han sido usados únicamente en barros con cal mientras que los otros cuatro han sido empleados en barros con contenido de cal como con coagulantes. Tanto las centrífugas como, los filtros prensa de banda y los filtros al vacío son considerados sistemas de baja presión, mientras que los restantes tipos de filtros prensa (de diafragma, y de plato y marco) pueden operar a presiones más altas produciendo una torta de barro con mayor concentración de sólidos.

En barros provenientes de plantas convencionales, centrífugas y filtros prensa de banda producen una torta de barro con una concentración de sólidos de entre un 15 a un 25%. En el caso de los filtros prensa de diafragma, y de plato y marco la concentración de sólidos puede alcanzar entre un 30 y un 45%, aunque existe limitada experiencia en la operación de filtros de diafragma.

La elección del equipo se basa en la concentración de sólidos requerida al final del proceso de deshidratación. Sin embargo, aun cuando la concentración de sólidos requerida sea elevada, puede resultar económico emplear dispositivos de baja presión seguido por un secado con aire a fin de obtener la concentración de sólidos deseada.

7.2.1 Filtro de tambor al vacío

Existen distintos tipos de filtros al vacío, pero todos tienen la misma limitación que es que la máxima presión teórica diferencial que puede aplicarse es la atmosférica (103 kPa). En la práctica la presión alcanzada es de 70 kPa.

El funcionamiento del equipo se basa en un tambor posicionado horizontalmente dentro de una cuba que contiene el lodo. A fin de mejorar el proceso de deshidratación, el barro es usualmente acondicionado con algún tipo de coagulante. Este tambor gira parcialmente sumergido dentro del recipiente con un movimiento lento, variando de 1/8 a 1 rotación por minuto (RPM)

La superficie del tambor se encuentra dividida en sectores que sirven de soporte para un medio filtrante. La presión negativa es aplicada en cada sector por medio de tubos internos. La superficie del tambor se encuentra envuelta por un medio filtrante (manta) a través de la cual el agua drenada pasa. Los sólidos son depositados sobre la manta y luego son removidos por raspadores afuera del sistema.

Los materiales empleados como medios filtrantes son telas filtrantes o mallas metálicas en espiral. La selección de la misma dependerá del barro a tratar.

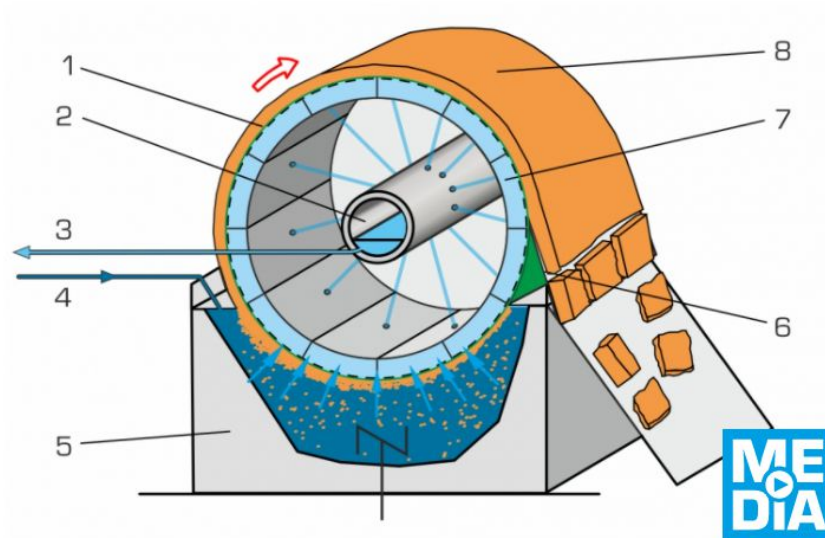
Entre un 10 y 40 % del tambor se encuentra sumergida dentro de la cuba que contiene el residuo de lodo. Esta zona sumergida es el área donde se formará la torta de barro. Cuando la presión de vacío es aplicada, el líquido que se encuentra en el barro filtra a través de la manta quedando formada la torta de lodo sobre la superficie.

El sector de secado de barro, representa entre un 40 y un 60 % de la superficie del tambor. En esta zona, la humedad de la torta es reducida por medio de la presión de vacío. Luego del secado, el barro entra en la zona de descarga, donde es removida del cilindro. Esto se logra, al abandonar la membrana el cilindro y pasar a través de un rodillo de pequeño diámetro que facilita la descarga de la torta.

Rendimientos de 50 a 100 kg/m².h son típicos para barros con cal, mientras que con alto contenido de carbonato de calcio se obtienen rendimientos del orden de los 200 a 450 kg/m².h.

La sequedad obtenida en un filtro de vacío oscila entre el 20 y el 25%.

A continuación en la **Figura 7**, se muestra un esquema típico de un de un filtro de tambor al vacío:



Esquema básico de un filtro de tambor: 1 tambor perforado con tela filtrante, 2 distribuidor de vacío, 3 vacío (para filtrado), 4 entrada de suspensión, 5 depósito de suspensión, 6 retirada de torta filtrante, 7 compartimento, 8 torta filtrante

FIGURA 7: ESQUEMA TÍPICO DE UN FILTRO DE TAMBOR AL VACÍO. FUENTE: G.U.N.T.

Las instalaciones de filtrado al vacío deben incluir: (Crisanto; 2012)

- Bombas para vacío
- Entrada de productos químicos
- Filtro de vacío
- Tanque de recuperación
- Bomba para el filtrado
- Correa para transporte del lodo
- Receptor del lodo

Las dimensiones de los filtros al vacío, varían de entre 1,0 a 3,6 m de diámetro y de 0,90 a 6,00m de longitud, dependiendo del tipo de equipo. En el caso de barros muy diluidos (de 1% a 2% de sólidos), se hace necesario pre acondicionar el barro para la deshidratación, utilizando cal, cloruro férrico o algún polielectrolito.

7.2.2 Filtro de bandas

Un filtro de banda típico consiste en tres etapas:

- Acondicionamiento químico
- Secado por gravedad (sobre cinta transportadora)
- Deshidratación por compresión

El proceso de deshidratación comienza luego que el barro es adecuadamente acondicionado, generalmente con polímeros. Luego el barro ingresa al secado por gravedad, donde es distribuido

uniformemente sobre una cinta transportadora porosa. Fácilmente el agua contenida en el lodo drena a través de la banda mientras el barro viaja sobre la cinta. Esta etapa dura generalmente entre 1 y 2 minutos. Luego del secado por gravedad, el lodo parcialmente deshidratado entra en la etapa de secado por compresión. En esta etapa, el barro es introducido entre dos bandas de material poroso que atraviesan un paso con forma de S sobre numerosos rodillos. Ambas bandas operan bajo la misma presión, que permite la deshidratación por presión del barro. El paso a través de los rodillos crea esfuerzos de corte que colaboran en el proceso de deshidratación. Estos esfuerzos de compresión se incrementan con el pasaje del barro a través de los rodillos. (Ver **Figura 8**)

Un acondicionamiento apropiado es considerado crítico para obtener resultados aceptables. En general, se emplean dosis de polímeros de entre 1 a 2.5 g/kg. El polímero es primero diluido entre un 0.25 a 0.50 por ciento por peso previo a su aplicación en el barro. Luego el barro y el polímero son mezclados. El tiempo de mezcla dependerá de las características del barro y del tipo de polímero empleado.

El diseño y selección de un filtro banda está habitualmente basado en el rendimiento del equipo. El rendimiento del equipo puede estar limitado por el contenido de agua o el contenido de sólidos en el barro, siendo valores típicos alcanzados de sequedad entre un 20 y 25%. Generalmente, la carga de sólidos se considera el factor más crítico por lo que el rendimiento se expresa en términos de carga de sólidos. Los rangos de carga para barros con coagulantes se encuentran en el rango de los 150kg/m.h.

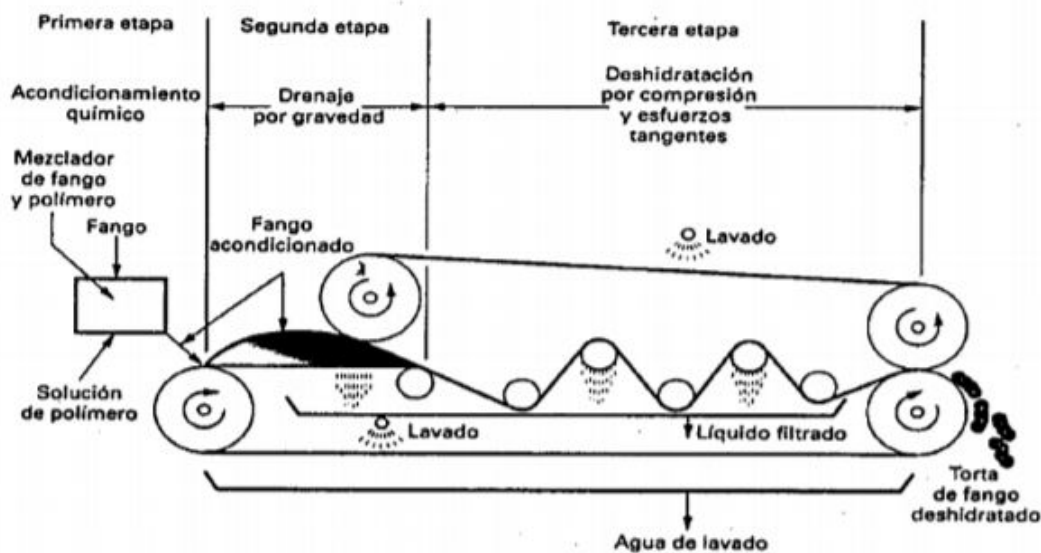


FIGURA 8: ESQUEMA TÍPICO FILTRO DE BANDAS. FUENTE: UNIVERSIDAD DE CORUÑA. TECNOLOGÍAS DE DESHIDRATACIÓN DE FANGOS

7.2.3 Centrifugas

El centrifugado de barros es un proceso de decantación mejorado por la aplicación de la fuerza centrífuga. El proceso de separación de las fases sólidas y líquidas es muy similar al que tiene lugar en el espesamiento por gravedad. La diferencia es que con las centrifugas se le aplica al barro una fuerza centrífuga que supera a la gravedad y es la que provoca la separación y concentración de los sólidos en suspensión. La aplicación de la fuerza centrífuga sobre el fango hace que los sólidos en suspensión se desplacen alejándose del eje de rotación de la centrifuga.

En los tanques de sedimentación convencionales, los sólidos son afectados por la fuerza de aceleración debida a la gravedad. Durante el proceso de centrifugado, la fuerza aplicada es $r\omega^2$, donde r es la distancia de una partícula al eje de rotación y ω es la velocidad rotacional. En las centrifugas modernas $r\omega^2$ puede encontrarse entre 1500 a 4000 veces el valor de g .

El tipo de centrifugas que se emplea para la deshidratación de barros provenientes de plantas de tratamiento de aguas son las de eje horizontal. Estos equipos consisten en una unidad horizontal con un tornillo helicoidal en su interior. La unidad es alimentada de forma continua, decantando los sólidos en la pared interna de la carcasa. El tornillo helicoidal rota una velocidad ligeramente diferente a la de la carcasa transportando el barro deshidratado al extremo de la centrifuga donde es descargado. El agua es direccionada desde el eje central de la centrifuga hacia el otro extremo de la centrifuga donde es descargado.

La mejor forma de evaluar el desempeño de una centrifuga es a través de un ensayo piloto. En estos ensayos deben obtenerse parámetros de operación tales como tasa de alimentación, concentración de sólidos del barro, acondicionamiento mediante polímeros, velocidad de rotación de la carcasa, profundidad de la piletta donde se descarga el agua y velocidad de giro del tornillo helicoidal.

A continuación en la **Figura 9**, se muestra un esquema típico de centrifugas:

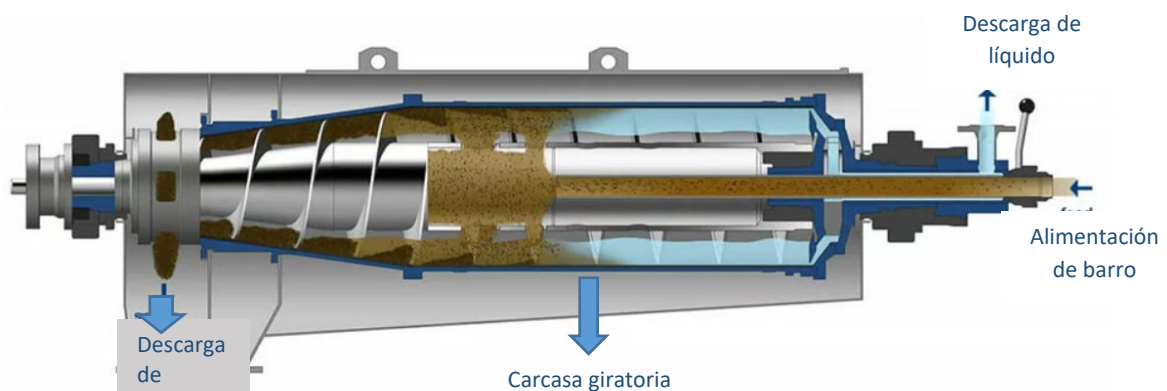


FIGURA 9: ESQUEMA TÍPICO CENTRÍFUGA. FUENTE: FLOTTWEG

7.2.4 Filtro prensa

El filtro prensa es otra opción disponible para la deshidratación de barros, y generalmente produce una torta con una mayor concentración de sólidos, comparado con los restantes equipos de deshidratación mecánica. Permite obtener un filtrado muy clarificado. Los inconvenientes que presentan son la complejidad mecánica, los elevados costos en reactivos, y la limitada vida útil de las telas de filtro.

En un filtro prensa la deshidratación se lleva a cabo forzando la evacuación del agua presente en el fango por la aplicación de una presión elevada.

Estos filtros consisten en una serie de placas rectangulares que se colocan enfrentadas entre sí y en posición vertical sobre un bastidor con un extremo fijo y otro móvil. Sobre cada una de estas placas se encuentra colocada una tela filtrante. El espacio resultante en el centro de estas placas, es el espesor que adquirirá la torta resultante. Este espesor puede rondar entre los 15-30 mm. Las placas se mantienen juntas con fuerza suficiente para que se adhieran herméticamente y así resistir la presión aplicada durante el proceso de filtración. Para que las placas se mantengan unidas, se emplean prensas hidráulicas o tornillos accionados mecánicamente. La superficie de los filtros puede ser de hasta 400 m², y la superficie de las placas de 2m², pudiendo estar formados por más de 100 placas (Ver **Figura 10** y **Figura 11**).

Durante el funcionamiento el barro, acondicionado químicamente, se bombea al espacio existente entre las placas, y se aplica una presión variable de entre 690 y 1550kN/m², la cual se mantiene durante un período de entre 1 y 3 horas, forzando al líquido a pasar a través de la tela filtrante y de los orificios de salida de las placas. Seguidamente, se separan las placas y se extraen la torta de fango

Las fases de funcionamiento de un filtro prensa son:

- Llenado con una duración de 15 a 20 minutos
- Filtrado con una duración que oscila entre 1 y 3 horas en función del tipo de barro
- Vaciado con una duración de 30 minutos
- Lavado con una duración de 30 minutos cada 2 o 3 filtrados

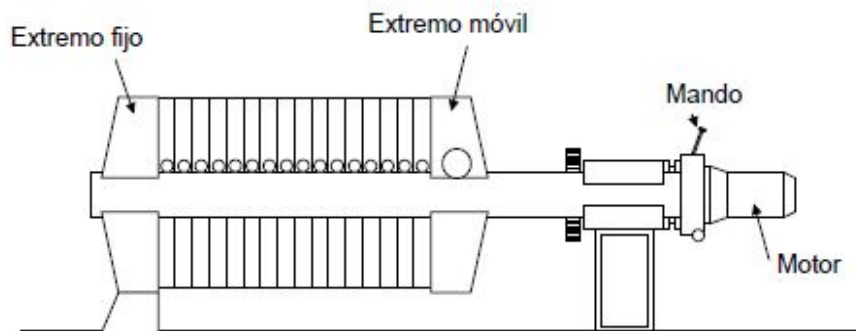


FIGURA 10: ESQUEMA DE UN FILTRO PRENSA. FUENTE: INDITEX

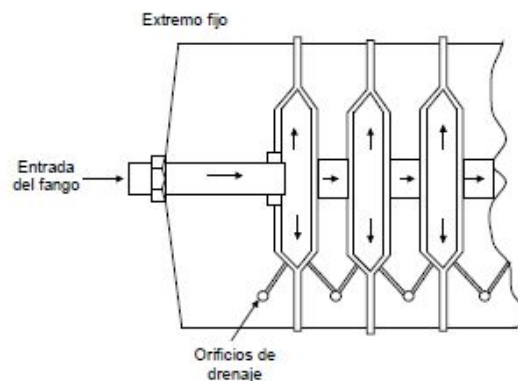


FIGURA 11: CROQUIS INGRESO DE BARROS. FUENTE: INDITEX

Los filtros prensa funcionan de forma discontinua, a diferencia de los métodos de deshidratación descriptos con anterioridad.

La ventaja principal de los filtros prensa es su capacidad para conseguir sequedades al 35%. Si bien los costos energéticos son equiparables a la filtración por vacío, tienen un costo de inversión muy alto necesitando una gran cantidad de reactivos en la fase de acondicionamiento y generan altos costos de explotación.

7.2.5 Comparación de los sistemas de deshidratación mecánica

A continuación, en la Tabla 3, se muestra un resumen de las características de los sistemas de filtración mecánica:

TABLA 3: COMPARACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS SISTEMAS DE DESHIDRATACIÓN MECÁNICA FUENTE: INDITEX

PROCESO	SEQUEZAD TORTA %	CONSUMO DE ENERGÍA Kw/T-ss	COSTO DE INVERSIÓN
FILTRO DE TAMBOR AL VACÍO	15-25	40-60	Medio
CENTRIFUGA	20-25	60-80	Medio
F.BANDA	20-25	30-40	Alto
F. PRENSA	40-45	40-60	Muy alto

7.3 Métodos no mecánicos para la deshidratación de residuos sólidos/líquidos

7.3.1 Playas de secado

Las playas de secado, constituyen un método de deshidratación de residuos líquidos/ semisólidos que no requiere de un medio mecánico para el secado, como los distintos tipos de dispositivos descritos anteriormente. Esta metodología es utilizada en lugares donde existe terreno disponible para su ejecución y condiciones climáticas favorables (J. Rusell et. all., 1996).

Como se mencionó con anterioridad, las playas de secado fueron originalmente desarrolladas para la deshidratación de los barros de plantas de tratamiento de líquidos cloacales, pero actualmente se utilizan también para la deshidratación de residuos originados en plantas de tratamiento de agua.

En general, las playas de secado se proyectan con un manto sostén de grava (h=20-45 cm, tamaño efectivo 32 a 25.4 mm) sobre el cual se coloca una capa de arena (h=10-23cm, tamaño efectivo entre 0.3 y 1.2 mm y coeficiente de uniformidad menor a 5) (C. Adams. et all., 1981).

A continuación, en la **Figura 12** se muestra una sección típica de una playa de secado:

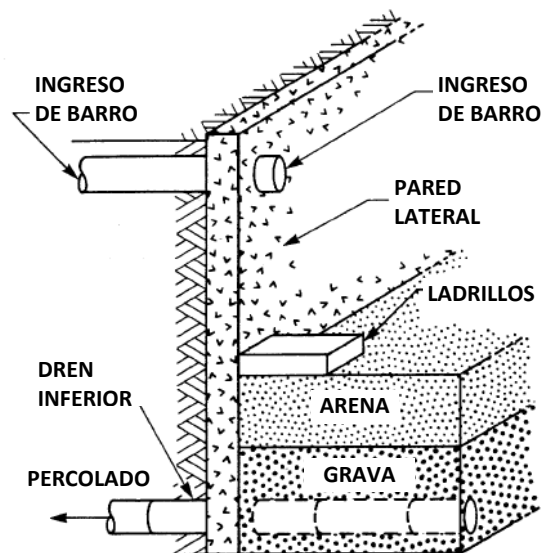


FIGURA 12: SECCIÓN TÍPICA DE PLAYAS DE SECADO. FUENTE: USEPA 1996

El barro es colocado sobre las playas, generalmente en un espesor de entre 20 y 30 cm, produciéndose la deshidratación mediante dos mecanismos: filtración y evaporación a través de la radiación y convección.

El agua contenida en las capas de barro, drena a través de los mantos filtrantes para luego ser colectada mediante una serie de drenes. Estos drenes son generalmente de PVC de diámetro 10cm, con ranuras

superiores que permiten la recolección del percolado, llevándolo hacia un punto de descarga. Este proceso continúa hasta que la arena se colmata con las pequeñas partículas o bien hasta que el agua contenida en el residuo drena por completo, lo cual requiere de uno a tres días removiéndose hasta un 60% del agua originalmente presente. Al final de esta etapa se alcanzan concentraciones de sólidos secos de hasta 20-25 por ciento.

La humedad remanente en los barroes que no ha sido eliminada durante el percolado es eliminada a través del proceso de evaporación, luego de un período de tiempo necesario para alcanzar la concentración final deseada de sólidos. El proceso de evaporación alcanzará un contenido de humedad crítica hasta alcanzar un punto de equilibrio. La humedad crítica se define como el punto en el cual el agua que migra hacia la superficie es menor que el rango de evaporación.

Las fases de secado del barro se ilustran en la **Figura 13**.

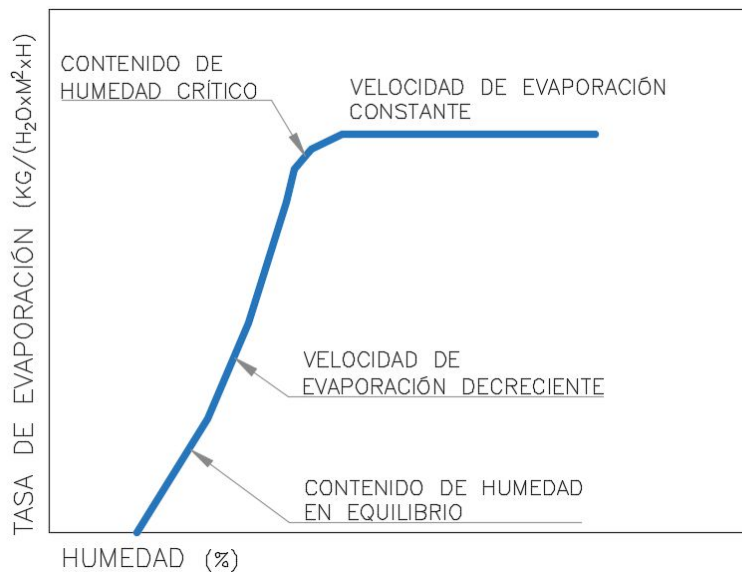


FIGURA 13: FASES DEL SECADO DEL BARRO. FUENTE ADAMS ET. ALL. 1981

El período de secado luego de alcanzado el punto de humedad crítica dependerá directamente del espesor del barro, sus características físicas y químicas, y las condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y precipitaciones). La tasa de secado puede ser relacionada matemáticamente al calor que se necesita transferir para evaporar el agua y para transferir el agua interior hacia la superficie.

Es fundamental conocer cuándo debe rotarse el uso de una playa, de modo que cuando una playa se encuentra colmatada y el residuo comienza a deshidratarse otra playa debe encontrarse limpia y lista para comenzar a ser cargada.

La limpieza de las playas puede realizarse de forma mecánica o manual siendo a veces esta primera más compleja.

El tiempo requerido para evaporar el agua remanente luego del percolado y la decantación de los sólidos, es un factor concluyente para determinar las dimensiones de las playas. Es por ello que si se maximiza la remoción de agua previa a la evaporación mejorará el rendimiento de la playa. La concentración de sólidos que queda sobre las playas, una vez que se produce el percolado, dependerá de la concentración inicial de los sólidos, el uso de agentes químicos como polímeros, la profundidad del barro aplicado y de la eficiencia del sistema para remover el agua.

El área de las playas de secado debe determinarse a partir de la producción mensual de sólidos, las precipitaciones y los porcentajes de evaporación así como también de las características del barro.

Las cargas de las playas son muy específicas según el sitio dónde se encuentren implantadas, pero en general suelen encontrarse en el rango de **los 50-150 kg/m²*año** para barros con coagulantes.

El acondicionamiento de barros mediante polímeros (1g/kg) puede significativamente aumentar la concentración de sólidos y por lo tanto la eficiencia de secado de la playa. Para el caso de barros provenientes de sistemas de ablandamiento con cal, el rango de carga se encuentra en 20-100 kg/m². Para estos barros, el empleo de polímeros no incrementa la eficiencia en el secado.

7.3.2 Deshidratación de lodo con sistema cubierto

Para acelerar los procesos de secado en las playas se han realizado investigaciones con distintos tipos de cobertura. (Ver **Figura 14**)

Como se mencionó con anterioridad cualquier proceso de secado se basa en el hecho que las moléculas de agua pasan de estado líquido a gaseoso, transformándose en el llamado vapor. Para que eso ocurra, cierta cantidad de energía es requerida, pudiendo ser brindada por el sol.

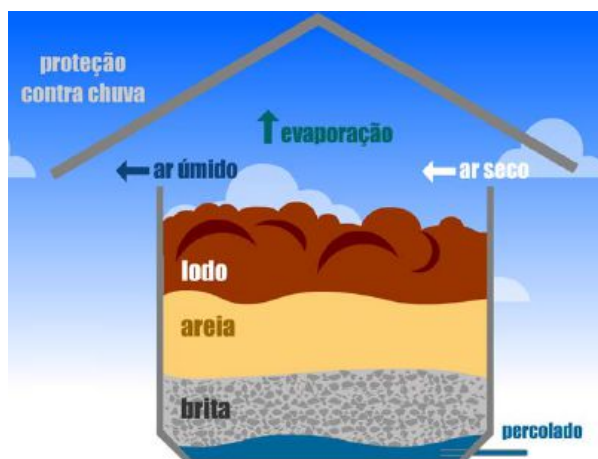


FIGURA 14: ESQUEMA SIMPLIFICADO: PLAYA DE SECADO CON COBERTURA PLÁSTICA Y RENOVACIÓN DE AIRE (FUENTE: FELCIO DOS REIS ET AL, 2011)

Las formas de transmisión de calor, fundamentalmente diferente y regida por leyes propias deben ser criteriosamente consideradas para favorecer el proceso de evaporación de agua presente en los residuos. Estas formas de transmisión de calor son conocidas como conducción, convección y radiación.

La conducción es un proceso en el cual el calor fluye de una región de temperatura elevada para otra de temperatura más baja, dentro de un medio (sólido, líquido o gaseoso) o entre medios diferentes en contacto físico directo. En la transmisión de calor por conducción, la energía es transmitida por medio de comunicación directa sin aparente desplazamiento de las moléculas. De acuerdo a la teoría cinética, la temperatura de un elemento de materia es proporcional a la energía cinética media de las moléculas que lo constituyen.

En cuanto a la transmisión de calor por convección, puede ser descrita como una operación de transporte de energía por la acción combinada de la conducción de calor, almacenamiento de energía y mezcla de movimiento.

La transmisión de calor por radiación ocurre cuando el calor se transmite de una región a otra sin que haya un contacto directo con la fuente de calor.

En este caso, el objetivo es crear una atmósfera artificial que favorezca el secado de los lodos por lo que la humedad generada internamente debe ser liberada, o sea a fin de evitar un equilibrio entre la presión de vapor dentro y fuera del lodo el aire debe ser liberado fuera del sector de secado de los lodos. La idea no es que el aire húmedo quede internamente sobre la cobertura plástica si no que sea liberado hacia el exterior de forma que se permita el ingreso continuo de aire seco dentro de la estructura. (Ver **Figura 15**)

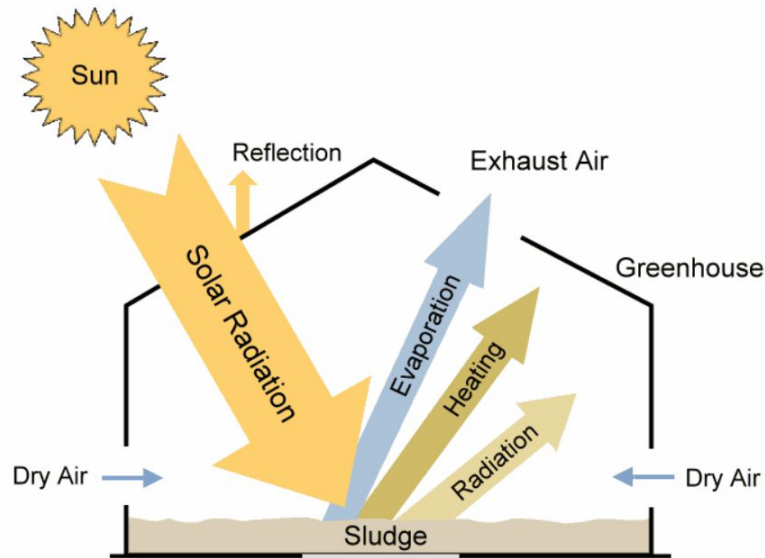


FIGURA 15: SECADO DE BARROS POR RADIACIÓN. FUENTE: WWW.WENDEWOLF.COM

Otra alternativa que existe en las coberturas plásticas para la aceleración del proceso de secado de lodos es la existencia de aberturas superiores para ventilación con ventiladores axiales para ayudar a la salida del aire húmedo. (Ver **Figura 16**)

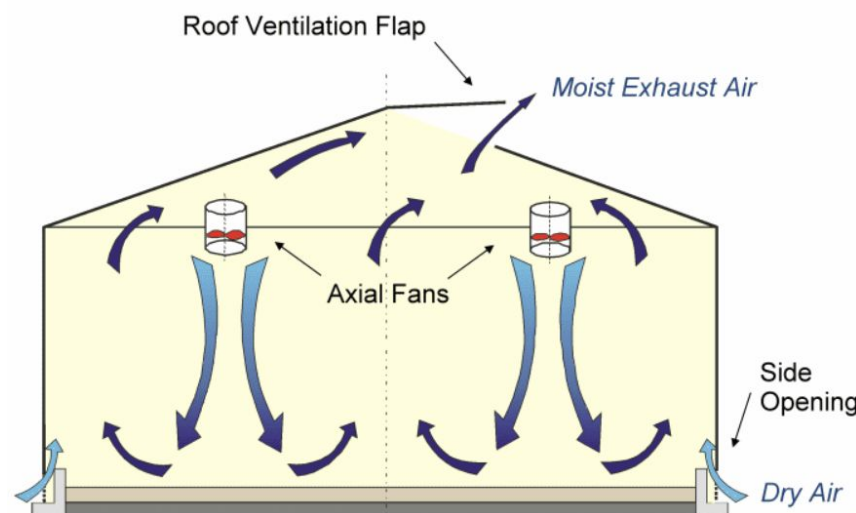


FIGURA 16: SECADO DE BARROS POR RADIACIÓN Y VENTILADORES AXIALES.

FUENTE: WWW.WENDEWOLF.COM

Las coberturas plásticas, así como las placas solares, deben poseer una cierta inclinación y orientación adecuada conforme a la región donde se encuentren localizadas de modo que exista mayor

aprovechamiento de la radiación, resultando en un mejor direccionamiento de los rayos refractados y un mayor calentamiento interno.

En lo que respecta al ángulo de inclinación de la cobertura, es importante que sea igual o lo más próxima a la latitud del lugar donde se encuentra la instalación. Normalmente se le adicionan unos 10° a este ángulo, para compensar la variación anual de la declinación solar.

En cuanto a la orientación, es imprescindible que por lo menos uno de los lados de la cobertura (preferentemente el lado de mayor área) se encuentre orientado para el hemisferio opuesto al que se localiza. Es decir, si la cobertura fue instalada en una playa de secado localizada en Brasil, uno de los lados debe orientarse hacia el Norte ya que Brasil se sitúa en el hemisferio Sur.

Dado que no existe bibliografía referente a los sistemas naturales de deshidratación con cobertura plástica en plantas de tratamiento de agua, se presentarán algunas aplicaciones de estas estructuras en sistemas de tratamiento de líquidos cloacales en plantas de Brasil.

La planta Lavapés localizada en San José de los Campos, SP Brasil, emplea un sistema de lodos activados de alta tasa con una tasa media de generación diaria de lodo barros de 30 toneladas.

En este caso se empleó una cobertura plástica para auxiliar el proceso de remoción de agua del lodo debido a la búsqueda de una alternativa para el destino final de lodo. Una primera alternativa, previo al empleo de la cobertura plástica, fue la estabilización con cal del barro para luego disponer los lodos en un relleno sanitario. Pero debido a la posibilidad de poder emplear el residuo en el proceso de compostaje ya que este además de dar una solución al residuo puede resultar como fertilizante agrícola se optó por el uso de coberturas plásticas. Estas coberturas pueden observarse en la **Figura 17** a adopción de esta alternativa resultó en la producción de fertilizante orgánico.



FIGURA 17: DISPOSICIÓN DE LODO EN PLANTA DE TRATAMIENTO DE DESAGÜES CLOCALES EN LÍNEAS DE COMPOSTAJE (FUENTE: FELCIO DOS REIS ET AL, 2011)

Otra de las plantas de tratamientos de líquidos cloacales que emplea cobertura plástica para la remoción de agua del lodo, es la planta de Sao Luiz do Paitinga (**Figura 18** y **Figura 19**).



FIGURA 18: INTERIOR DE PLAYA DE SECADO CUBIERTA DE PLANTA DE TRATAMIENTO (FUENTE: FELCIO DOS REIS ET AL, 2011)



FIGURA 19: PLAYAS DE SECADO CUBIERTAS, PLANTA DE TRATAMIENTO SAO LUIZ DO PARAITINGA (FUENTE: FELCIO DOS REIS ET AL, 2011)

Otra planta que incorporó la cubierta plástica para mejorar la remoción de agua en el lodo es la planta de tratamiento de líquidos cloacales de EMBAÚ, en Cacheira Paulista-SP. (Figura 20)



FIGURA 20: ESQUEMA PLAYAS DE SECADO CUBIERTAS, PLANTA DE TRATAMIENTO DE EMBAÚ, CACHEIRA PAULISTA-SP

Estas dos últimas plantas (**Figura 18**, **Figura 19**, **Figura 20**), tienen en común que la cobertura plástica fue aplicada sobre playas de secado tradicionales (R. F. Dos Reis et al., 2011).

En la ciudad de Bursa, Turquía, el establecimiento de plantas de tratamiento de líquidos cloacales causa un enorme y costoso problema en lo que respecta a la disposición de barros (N. Salihoglu et al., 2006).

El barro generado en estas plantas, se espesa mediante deshidratación mecánica hasta obtener un porcentaje de sólidos secos de 20%. Sin embargo, este contenido debía ser incrementado a un 35% para poder colocar estos barros en un relleno sanitario de acuerdo a la normativa legal vigente. Es por ello que, luego de la deshidratación mecánica se proyectó un tratamiento con cal no solo para aumentar los sólidos secos sino también para lograr la correcta desinfección del barro. Para obtener un porcentaje de sólidos secos que pase del 20% al 35% de sólidos secos en el barro debieron agregarse unas 75 toneladas de cal/día.

En este caso, se planteó un diseño experimental de dos playas de secado, una cubierta y otra no con el objetivo de evaluar la suplantación de la cal por la deshidratación solar. Las dos playas poseían una dimensión en planta de 2x5 metros. En ambas playas el barro fue esparcido en capas de 25cm de alto.

La playa cubierta fue construida como un túnel tipo invernadero con un techo a una altura de 2.50m y totalmente cerrada por dos paredes de 10mm de espesor de policarbonato transparente con una transmitancia de la luz del 80%. La planta fue construida con el principio de aumentar las diferencias entre la presión relativa del vapor del barro y la presión interna relativa para obtener un secado efectivo del barro. El aire que se acumula en el interior de la playa durante el día es orientado hacia una capa de roca para la conservación de la energía. A continuación en la **Figura 21** se muestra un esquema del diseño de la playa:

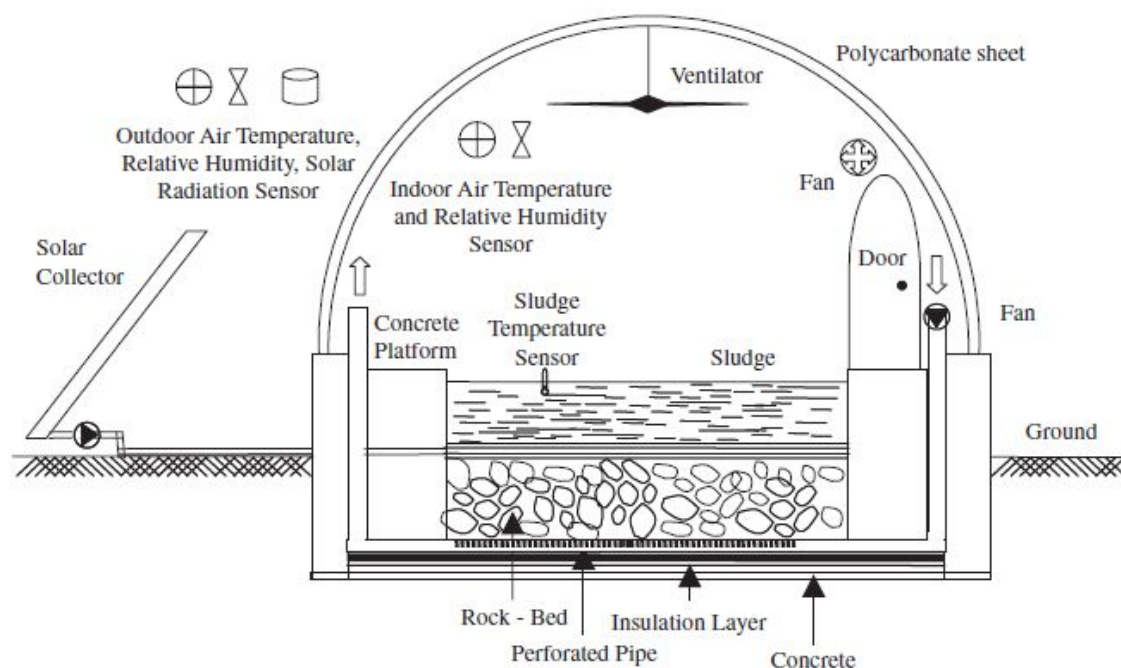


FIGURA 21: ESQUEMA DE LA PLANTA DE SECADO SOLAR CUBIERTA DE LA CIUDAD DE BURSA, TURQUÍA. (FUENTE: SALIHOGLU ET.A.L, 2006)

A fin de airear la superficie del lodo, se colocó un ventilador en el techo. La capa saturada sobre la superficie del barro se remueve con la turbulencia del aire provista por el ventilador. Así mismo, el aire saturado acumulado en la planta es descargado por medio de dos extractores ubicados sobre las puertas de ingreso de las plantas, garantizando así la renovación del aire.

El efecto invernadero generado en la playa provee un efectivo uso de la energía solar, pues el área de hormigón de 10m² de la planta fue calentado mediante una serie de tuberías con agua caliente conectadas a dos placas solares. Una cama de roca térmica de unos 50 cm de alto fue construida debajo del piso de hormigón. Esta capa estaba compuesta por rocas de entre 16-48mm de diámetro. El aire caliente y saturado del interior de la playa fue reutilizado y enviado hacia la cama de roca con 4 ventiladores axiales de 100 mm de diámetro y 90 m³/h de caudal de aire.

Además el barro fue mezclado manualmente dos veces al día para la renovación del mismo.

En el caso de la playa “abierta”, también posee un fondo impermeable de hormigón, teniendo aireación superficial a través del efecto del viento, y el calentamiento del barro a través de la exposición directa a la radiación solar. La renovación superficial del barro fue provista mediante el mezclado manual, dos veces al día.

El contenido de sólidos fue medido constantemente durante el proceso de secado tanto en la planta cubierta como en la playa abierta tanto en períodos invernales como estivales. Al evaluar los resultados, se observó que el secado en las playas cubiertas resultó en valores más elevados de sólidos secos que en la playa abierta en ambos períodos. En las playas cubiertas, comenzando el proceso de deshidratación con un porcentaje de sólidos del 20% se alcanzó el límite legal exigido para su disposición final del 35% de sólidos en 30 días en invierno y 15 días en verano. Así mismo, el volumen de barro se redujo de 255 a 145 kg/m². En los que respecta a las playas abiertas, no es posible garantizar que se alcance el 35% de contenido de sólidos en un período definido de tiempo, pues la lluvia puede afectar el secado en cualquier etapa del proceso.

El sistema cubierto proveyó un efecto invernadero en un volumen controlado, permitiendo que la temperatura del barro dentro de la playa se encuentre entre $11 \pm 2^\circ\text{C}$ más elevada que la temperatura en el exterior. El aire calentado durante el día, es direccionado hacia la capa de rocas, por lo que el barro perdía solo una pequeña parte de su temperatura pese a un descenso importante en el exterior. De todos modos, entre 1 y 2 horas antes que el sol salga se generaba un punto de rocío interior debido a la diferencia de humedad y temperatura entre el interior y el exterior. Se observó que el sistema de extractores no fue suficientes para evacuar el aire saturado acumulado en la playa. Si las renovaciones se hubiesen proyectado en función a la diferencia de humedad en el interior y exterior de la playa, el problema de condensación no hubiese ocurrido y los resultados de secado hubiesen sido aún más favorables.

En el sistema abierto, el barro fue expuesto a todas las condiciones climáticas que ocurrían en el ambiente. Por ejemplo, la lluvia afectaba directamente el funcionamiento del sistema así como también el descenso de la temperatura y la velocidad del viento. (N. Salihoglu et al., 2006)

7.3.3 Lagunas de secado

Las lagunas de secado son muy similares a las playas de secado, excepto que operan a una carga inicial más alta y por lo tanto los períodos de secado son más extensos. (D. Cornwell et.al., 1999)

Son uno de los procesos de secado más antiguos empleados para tratar residuos en plantas de tratamiento de agua. El principal responsable de la deshidratación de barros en las lagunas es el clima.

En climas cálidos y áridos, el secado es por radiación solar y en climas fríos el congelamiento es el responsable del proceso (J. Rusell et.al., 1996)

El proceso de secado en lagunas se basa en dos principios: drenaje de agua libre y evaporación.

El sobrenadante debe ser removido continuamente o de forma intermitente, pudiendo ser recirculada al inicio del tratamiento. Es indispensable que se realice este procedimiento pues favorece que los sólidos decantados queden expuestos y el proceso de evaporación sea eficaz para la formación de la torta de barro.

El ciclo de secado varía en función de diversos factores que deben ser analizados en la etapa de proyecto como son: el clima, la permeabilidad del suelo, las características del lodo, la profundidad de la laguna y el área superficial.

El clima debe ser analizado según los siguientes aspectos:

- Precipitaciones: índices pluviométricos, distribución mensual y anual
- Temperaturas extremas
- Tasa de evaporación

Las lagunas poseen profundidades que varían de 0.7 a 1.40 m existiendo sistemas de hasta 3.00 m de profundidad. La tasa de aplicación (base seco) por área en lagunas de secado varía entre 40 kg/m^2 para regiones húmedas a 80 kg/m^2 para regiones áridas.

La operación y mantenimiento de las lagunas de secado involucran la aplicación de barro, remoción del sobrenadante, y remoción de los sólidos al final de cada ciclo. Eventualmente pueden realizarse algunas reparaciones en taludes (A.O. Fontana et all 2004).

Debido a las posibles filtraciones que puedan ocurrir durante el proceso de secado en lagunas, esta práctica genera gran preocupación ambiental.

En el caso particular de residuos de plantas de tratamiento de agua de remoción de As, el almacenamiento durante un tiempo prolongado de estos residuos, pueden liberar As que se encuentra presente en el residuo y ocasionar la consecuente contaminación del suelo y del agua subterránea.

Un factor de importancia que afecta la solubilidad del As es el tipo de coagulante empleado, siendo los más utilizados los siguientes:

- Cloruro de hierro: remueve el As como resultado de adsorción y no precipitación del arsénico ferroso. Es por ello, que no se recomienda que el residuo permanezca almacenado por largos períodos de tiempo en lagunas debido al riesgo que puede presentar la desorción y liberación del As.
- Sulfato de aluminio: remueve el arsénico por adsorción. No hay información disponible acerca de los efectos del almacenamiento de los residuos en plantas que emplean sulfato de aluminio como coagulante.

7.3.4 Deshidratación de barros mediante geotubos

Esta tecnología consiste en el almacenamiento de lodo en grandes unidades que poseen la forma de bolsa, constituidas por geotextil tejido de polipropileno de alta resistencia. Este sistema cumple simultáneamente con las funciones de contener la masa de sólidos así como también permitir el drenaje del líquido contenido en los barros. El drenaje ocurre a través de pequeños poros, permitiendo la reducción de volumen del residuo así como también el porcentaje de agua en el lodo. A medida que el volumen del lodo se va reduciendo, puede continuar llenándose la bolsa hasta completar su capacidad. (Ver **Figura 22** y **Figura 23**)

Una vez que se consolida el material que se encuentra dentro de la unidad, ésta es abierta para transportar el lodo deshidratado hacia el sitio de disposición final.

En Brasil, estos sistemas de remoción de agua han sido utilizados en dos plantas de tratamiento de agua: una en Curitibaanos – SC y otra en la de San Antonio de Jardín en SP.



FIGURA 22: BAGS INSTALADOS EN LA PLANTA DE CURITIBANOS-SC (Q=90L/s)



FIGURA 23: BAGS INSTALADOS EN LA PLANTA DE SAN ANTONIO-SP (Q=15L/S)

Dentro de las desventajas de este tipo de sistemas se encuentra el costo relativamente elevado de la unidad, necesidad de disponibilidad de espacio físico para alojarlas así como también la necesidad de tiempos prolongados de permanencia del barro para obtener una correcta deshidratación. (Renan Felicio Dos Reis, et all. 2011)

7.3.5 *Diseño de lecho de drenaje y sedimentador para reducir el volumen del lodo en decantadores. Experiencia realizada en Brasil*

En el año 2004, se desarrolló una investigación en la Universidad Federal de San Carlos, Brasil, con el fin de analizar el funcionamiento de un Lecho de Drenaje de manto de grava (como manto soporte y drenante) y sobre ella un manto de geotextil. Se evaluó el caso particular de la planta de tratamiento de agua superficial de Cardoso, donde los barros eran arrojados sin previo tratamiento al cuerpo receptor más próximo a la planta.

Como se mencionó con anterioridad, las playas de secado tradicionales poseen un manto de grava sostén y un manto filtrante de arena. Estos mantos fueron analizados (Cordero et.al 1993-2001), y se realizaron modificaciones en la estructura filtrante con el objetivo de aumentar la velocidad de drenaje, reemplazando el manto de arena por una manta geotextil, y denominando a esta nueva estructura el nombre de Lecho de Drenaje.

Considerando como factor fundamental en la evaporación del agua libre, el tiempo de drenaje, fueron realizados estudios a escala piloto, modificando las características de los lechos tradicionales (Cordero et.al 1993-2001). A continuación, en la **Figura 24** se muestran las distintas variantes que fueron ensayadas:

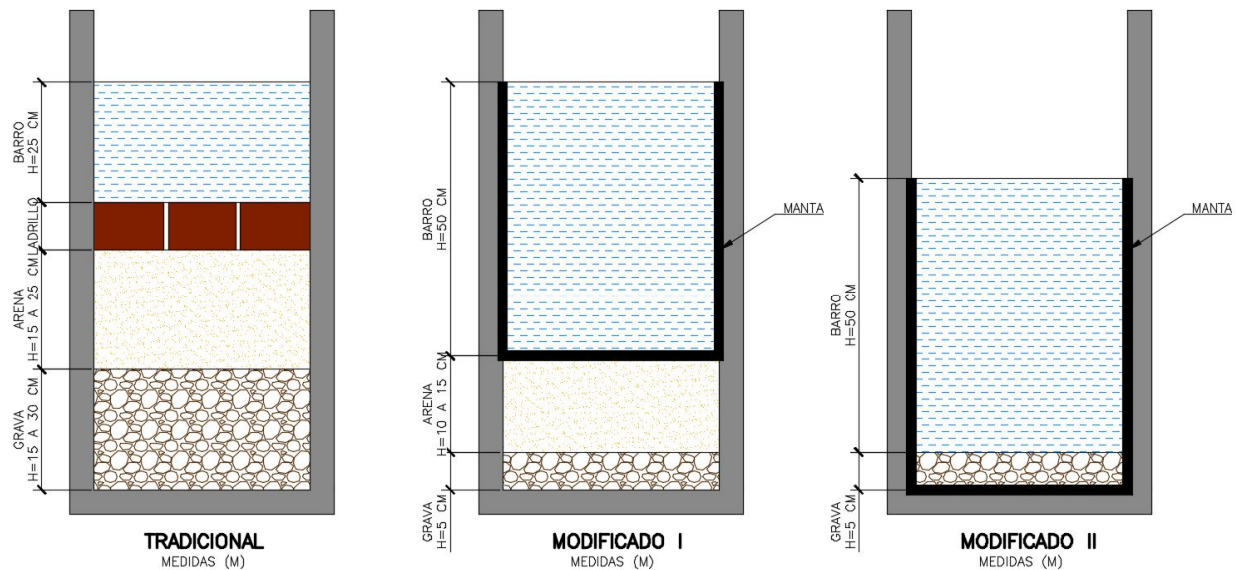


FIGURA 24: MODIFICACIÓN DE LOS LECHOS DE SECADO. (FONTANA, ET AL 2004)

Esta modificación tenía como objetivo disminuir el tiempo de drenaje, factor fundamental para remover el agua libre del lodo.

Se evaluó el comportamiento de distintas mantas textiles siendo la que presentó mejor desempeño durante el drenaje una cuya densidad superficial era de 600g/m².

Como resultado de esta investigación, se obtuvo que el lecho de drenaje a escala real debe estar constituido por una pequeña losa de fondo de hormigón con una inclinación del 2 al 3% hacia los puntos de colecta del percolado con paredes de 60cm de altura. Sobre la losa de fondo, debe aplicarse una capa soporte de grava y sobre ella una manta de geotextil. La colecta del drenado se realiza a través de unos tubos de PVC hacia las cámaras colectoras. La única gran diferencia con las playas de secado es el reemplazo de la capa filtrante de arena por una manta geotextil.

Una vez que el barro posee la humedad necesaria para su traslado a destino final, la manta es retirada y lavada con hidro lavadora para ser empleada nuevamente en el lecho de drenaje.

El primer prototipo de lecho de drenaje fue realizado por Cordeiro (Cordero et.al 1993-2001), en un recipiente de chapa galvanizada en forma de tronco de pirámide invertida, con capacidad para 240 litros. El lecho de drenaje, fue constituido por una capa soporte de 5cm de grava y sobre ella una manta de geotextil de 600g/m². (Ver Figura 25).



FIGURA 25: PROTOTIPO DE LECHO DE DRENAJE (CORDEIRO, ET.AL 2001)

El prototipo fue empleado para aplicar los residuos de los filtros y de los decantadores en periodos proporcionados por las características operacionales de lavado y descarga de efluentes. En la imagen que se muestra a continuación se observa el aspecto de la masa de barro luego del drenaje del agua libre. Se observan retracciones y fisuras de las áreas expuestas facilitando el proceso de evaporación. En el caso de precipitaciones, las rajaduras presentes contribuyen al libre drenaje del agua. (Ver **Figura 26**)



FIGURA 26: ASPECTO DEL LODO APLICADO EN EL PROTOTIPO DEL LECHO DE DRENAJE LUEGO DEL DRENAJE DE AGUA LIBRE (CORDEIRO ET.AL 2001)

8. PROCESO ArCIS-UNR®. Relevamiento de información

En el presente estudio se analizaron los tratamientos de barros de las plantas de Lezama, provincia de Buenos Aires, y Villa Cañás, en la provincia de Santa Fe, basadas en proceso ArCIS-UNR®.

8.1 Visita a la planta potabilizadora de Lezama, Provincia de Buenos Aires

En el año 2008, se instaló una planta ArCIS-UNR® en la localidad de Lezama con el objetivo de obtener un volumen de agua tratada de 912m³/día, para abastecerá unos 5000 habitantes. La operación y mantenimiento de la planta se encuentra a cargo de la Cooperativa de Lezama.

Como se mencionó previamente, esta planta servirá como base para el desarrollo del presente estudio, por lo que se realizaron varias visitas al lugar a fin de conocer el funcionamiento de la línea de tratamiento de barros. Una de las problemáticas que afronta la cooperativa, es la falta de capacidad de las playas de secado durante el invierno.

8.1.1 Línea de tratamiento de barros

Como fue descrito con anterioridad, una vez transcurrida la carrera de los filtros éstos deben ser lavados. El agua de lavado generada durante esta etapa, es enviada a una pileta de recuperación.

En el caso particular de esta planta, el último lavado de los filtros y prefiltros se realiza aproximadamente a las 10.00 hs. pm, comenzándose el bombeo hacia las playas de secado a las 7.30 am hs. Es decir que el agua de lavado permanece por aproximadamente 9.50 horas en la pileta de recuperación, favoreciendo la decantación del barro y quedando perfectamente definidas dos fases (barro –agua). A continuación, en la Figura 27, se muestra la línea de tratamiento de barros.



FIGURA 27: PILETA DE RECUPERACIÓN, PLANTA ARCIS-UNR®, LEZAMA PCIA. DE BS. AS.

Esta pileta posee dos equipos de bombeo, uno que envía los barros hacia las playas de secado y otro que recircula el agua hacia el inicio del proceso de potabilización. Este procedimiento no debe realizarse de manera conjunta, pues puede ocasionar la re-suspensión del barro e incorporar mayor cantidad de agua a

las playas. Es por ello que es preferible que el líquido a recircular se bombee previo al bombeo de los barros. En general, en la planta se realiza de forma simultánea el bombeo del sobrenadante y el barro.

El período de bombeo de los barros es de aproximadamente 1 hora, distribuyéndose 45 minutos por la mañana y 15 minutos por la tarde. Por la tarde sólo se bombea durante 15 minutos debido a la falta de capacidad de la playa de secado.

A continuación en la **Figura 28** y **Figura 29**, puede observarse el bombeo hacia la playa en operación y la que se encuentra en proceso de secado:



FIGURA 28: BOMBEO DE BARROS HACIA LA PLAYA DE SECADO



FIGURA 29: PLAYA EN PROCESO DE SECADO

Como se observa en la **Figura 29** la playa en proceso de secado, presentaba una pequeña capa de sobrenadante sobre la superficie, debido a que el día previo a la visita había llovido. Uno de los problemas que presenta la playa es el tiempo excesivo de drenaje.

Las playas de secado poseen una rotación de 1 mes en verano y 3 meses en invierno.

En lo que respecta a la disposición final de los barros una vez retirados de las playas, los mismos son trasladados en bolsas (tipo "big bag") de 1m³ de capacidad, extrayéndose entre 20 y 25 bolsones por playa.

El sitio donde son depositadas las bolsas, es un campo ubicado en las cercanías a la planta de tratamiento de líquidos cloacales de la localidad.

A continuación, en la **Figura 30** y **Figura 31** se muestra el sitio donde son depositados los big bags:



FIGURA 30: BARROS EN SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL



FIGURA 31: DISPOSICIÓN FINAL DE BARROS

8.2 Visita a la planta potabilizadora de Villa Cañas, provincia de Santa Fe

La primera planta ArCIS-UNR®, fue instalada en el año 2001, en la localidad de Villa Cañas. Esta ciudad se encuentra situada al sur de la provincia de Santa Fe a unos 180 km de la ciudad de Rosario. Allí se tratan unos 1200 m³/día de agua con el fin de abastecer a unos 10.000 habitantes. La planta se encuentra a cargo de la Cooperativa de Provisión de Agua Potable y Otros Servicios Públicos de Villa Cañas Ltda.

Esta planta posee similares características a la planta de Lezama, descrita previamente, solo que para el secado de barros se utilizan lagunas y no playas de secado.

Al momento de la visita, la planta se encontraba en proceso de remodelación, funcionando únicamente un solo prefiltro, por lo que el volumen de agua producida en ese momento era de 565 m³/día (aproximadamente la mitad del Q de diseño).

El objetivo de la visita fue conocer las instalaciones, caracterizar los barros y evaluar la línea de tratamiento de barros.

Pileta de lavado:

La pileta cuenta con dos bombas una de las cuales se utiliza para la recirculación del sobrenadante y la otra para el bombeo de barros. (Ver Figura 32)



FIGURA 32: PILETA DE LAVADO

Al llegar a la planta, se pudo observar que el agua de lavado se encontraba en reposo desde hacía unas dos horas por lo que podían diferenciarse dos fases: barro y sobrenadante. El lavado de los prefiltros se realiza una vez al día (cada 24 horas), mientras que los filtros rápidos se lavan cada 12 horas.

La bomba que envía los barros a las lagunas, se encuentra a aproximadamente 30 cm del fondo de la pileta. La misma bomba durante 2,5 horas una vez al día, con un $Q_{\text{bombeo}} = 1 \text{ l/s} = 3,6 \text{ m}^3/\text{h}$ (9m³/día).

Cabe destacar que, el bombeo de barros se hace de manera simultánea al bombeo del sobrenadante. Esto implica que los barros bombeados poseen gran contenido de agua. Lo óptimo sería, bombear primero el sobrenadante y una vez finalizada esta tarea continuar bombeando los barros.

La planta cuenta con dos lagunas de secado cuyas dimensiones son 58 metros de largo x 5 metros de ancho, que no son usadas de forma simultánea si no que se rota su uso cada un mes.

En la Figura 33 y Figura 34, pueden observarse la playa en operación al momento de la visita y la que se encontraba en proceso de secado:



FIGURA 33: LAGUNA DE SECADO (EN OPERACIÓN AL MOMENTO DE LA VISITA)



FIGURA 34: LAGUNA EN PROCESO DE SECADO

8.3 Caracterización de los barros de plantas relevadas:

A fin de evaluar las características del barro que se envía tanto a las lagunas como a las playas de secado, se tomaron muestras en la planta de Villa Cañás y Lezama, analizándose los sólidos totales y el porcentaje de humedad. A continuación, en la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos.

TABLA 4: SÓLIDOS TOTALES Y HUMEDAD EN BARROS PROVENIENTES DE PILETA DE RECUPERACIÓN

BARROS PROVENIENTES DEL BOMBEO A PLAYAS Y LAGUNAS DE SECADO		
PLANTA	SÓLIDOS TOTALES (mg/l)	% HUMEDAD
LEZAMA	4670 ~4700	99.53
V. CAÑÁS	1430	99.86

En lo que respecta a los sólidos sedimentados, se realizó el ensayo en los barros provenientes de las dos plantas. En las siguientes tablas se presentan los resultados. (VER TABLA 5 Y TABLA 6)

TABLA 5: SÓLIDOS SEDIMENTABLES, BARROS BOMBEADOS HACIA PLAYA DE SECADO. (LEZAMA)

PLANTA POTABILIZADORA: LEZAMA	
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	TIEMPO
0 ml/l	10'
980ml/l	2hs
450ml/l	4 días

TABLA 6: SÓLIDOS SEDIMENTABLES, BARROS BOMBEADOS HACIA LAGUNA DE SECADO. (VILLA CAÑÁS)

PLANTA POTABILIZADORA:V. CAÑÁS	
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	TIEMPO
0 ml/l	10'
0 ml/l	2hs
28ml/l	24hs

Al analizar los resultados, puede observarse que los sólidos sedimentables son mucho más bajos en Villa Cañás debido a la forma en que se extraen de la pileta de sedimentación

Se extrajeron muestras de las lagunas y de las playas que se encontraban en proceso de secado a fin de conocer el contenido de humedad de los mismos. En la Tabla 7, se muestran los resultados obtenidos:

TABLA 7: CONTENIDO DE HUMEDAD DE BARROS EN PLAYA Y LAGUNA EN PROCESO DE SECADO

ORIGEN BARROS: PLAYA/LAGUNA EN PROCESO DE SECADO	
% HUMEDAD	
LEZAMA	V. CAÑÁS
97.3	89.3

NOTA: El contenido de humedad de los barros en proceso de secado de la planta de Lezama, es superior al de Villa Cañás ya que el día previo a la toma de muestras había llovido, por lo que la playa presentaba una capa de sobrenadante.

A través de los valores de humedad se puede ver que el tipo de barros a tratar es muy diluido, con una muy baja concentración de sólidos. Los valores que se indican en la bibliografía corresponden a plantas que tratan aguas superficiales que contienen turbiedad y por lo tanto la concentración de sólidos es mayor. No se encontró en la bibliografía datos sobre barros provenientes de plantas de agua de remoción de As que utilicen PAC como coagulante.

8.3.1 Ensayo propuesto por Carl Adams

Este ensayo permite determinar los contenidos de sólidos en las distintas etapas de secado y determinar en forma experimental las fases de velocidad constante de infiltración y de velocidad decreciente de evaporación.

Este ensayo experimental requiere de un tubo de entre 10 y 15 cm de diámetro, en el cual se coloca una capa inferior de 5 cm de grava de tamaño efectivo 3.2 mm y sobre ella una capa de entre 10 y 20 cm de arena, tamaño efectivo 0.3-1.2mm. Debajo de la capa de grava, se coloca una malla metálica perforada, para permitir el paso del percolado y un embudo en el extremo del tubo que permite coleccionar el drenado. (Ver **Figura 35**)

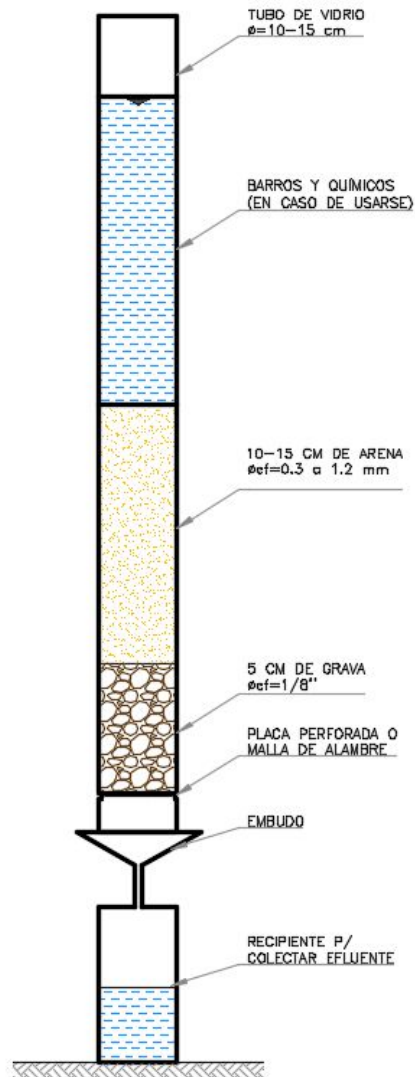


FIGURA 35: EQUIPO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR CONTENIDO DE SÓLIDOS(ADAMS, ET AL 1981).

A continuación, se describe el procedimiento a realizar:

- Aplicar el barro a ensayar en el cilindro en una altura de 30.5 a 45 cm. En caso de ser necesario, deberá agregarse los correspondientes químicos para acondicionar el barro.
- Se debe permitir que el agua contenida en el barro drene libremente. Esta etapa normalmente dura entre 1 y 3 días, dependiendo de la humedad inicial del barro.
- Una vez finalizada la etapa de drenaje deberá removerse el barro del cilindro. Es más efectivo remover el barro en cilindros de menos de 5 cm de diámetro través de un émbolo dejando que la arena y la grava baje por el sector inferior del tubo. Para cilindros de diámetro mayor, se deberá insertar un core de al menos 5 cm de diámetro y retirar el barro.
- Medir la humedad inicial de la muestra.
- Colocar la muestra en un plato abierto y permitir la evaporación.
- Periódicamente medir el contenido de humedad del barro. Una manera efectiva es usar un pequeño tubo de vidrio y tomar una pequeña muestra del barro. Continuar monitoreando la humedad hasta alcanzar la humedad deseada, que permita obtener una torta de barro que pueda transportarse. Para el caso de barros biológicos, se considera transportable para un contenido de sólidos del orden del 15 al 20%.

Este procedimiento debe repetirse para varias alturas de barro y químicos aplicados. Si luego de 5 a 8 horas el barro posee agua libre, el espesor del barro resulte excesivo.

Para realizar esta experiencia, es deseable tener valores acumulados de lluvia y evaporación. El tiempo de secado se calcula como el tiempo necesario para evaporar el agua de lluvia más el agua contenida en el barro.

Para determinar el área en planta necesaria deberá se deberá contar con la siguiente información:

* Lluvia local y evaporación por mes

* Multiplicar el rango de evaporación por 0.75 y el porcentaje de lluvia por 0.57. Estos valores están basados en la evidencia experimental de que el 43% del agua de lluvia es drenada a través de la torta quedando un 57% para ser evaporado. La fracción de la lluvia a ser evaporada varía de acuerdo al comportamiento e intensidad de las lluvias.

9. ENSAYOS EN LABORATORIO

Se programó la realización de ensayos a escala banco para simular el funcionamiento de las playas de secado para distintas granulometrías del manto filtrante y distintas condiciones de operación utilizando barros de una planta con tecnología ArCIS-UNR®.

9.1 Metodología

9.1.1 Diseño y construcción de reactores:

A continuación en la **Figura 36** se muestra un esquema del equipo experimental, que se diseñó para realizar los ensayos.

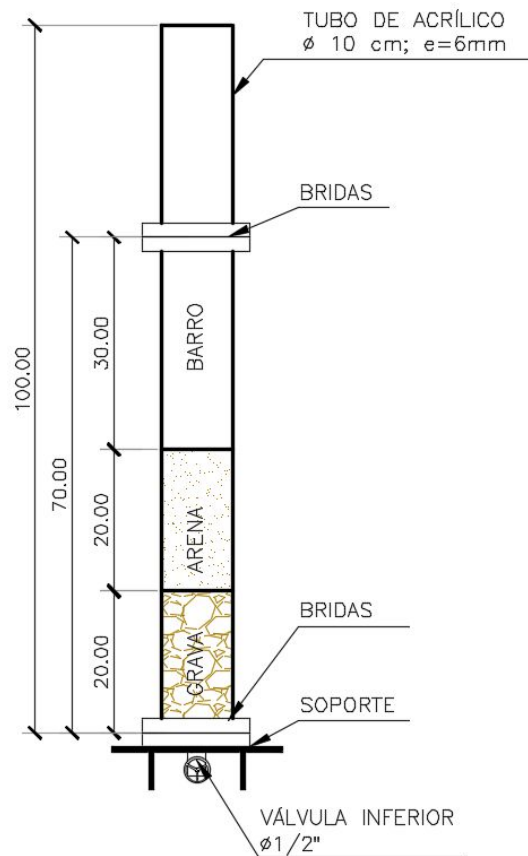


FIGURA 36: ESQUEMA REACTOR. TODAS LAS MEDIDAS SE ENCUENTRAN EN CM.

Se construyeron dos reactores a partir de dos tubos acrílicos de 10 cm de diámetro, 125 cm de altura y pared de 6 mm de espesor. A fin de facilitar el desarme del reactor, se proyectaron dos bridas: una sobre el fondo y otra a 70 cm del mismo.

En cuanto al manto filtrante, se evaluaron distintas granulometrías y combinaciones. Dado que el objetivo del proyecto es mejorar la fase de secado de barros, se evaluó realizar dos ensayos en paralelo empleando distintas granulometrías. A continuación, en la **Figura 37** pueden observarse los reactores diseñados los mantos filtrantes adoptados en cada reactor:

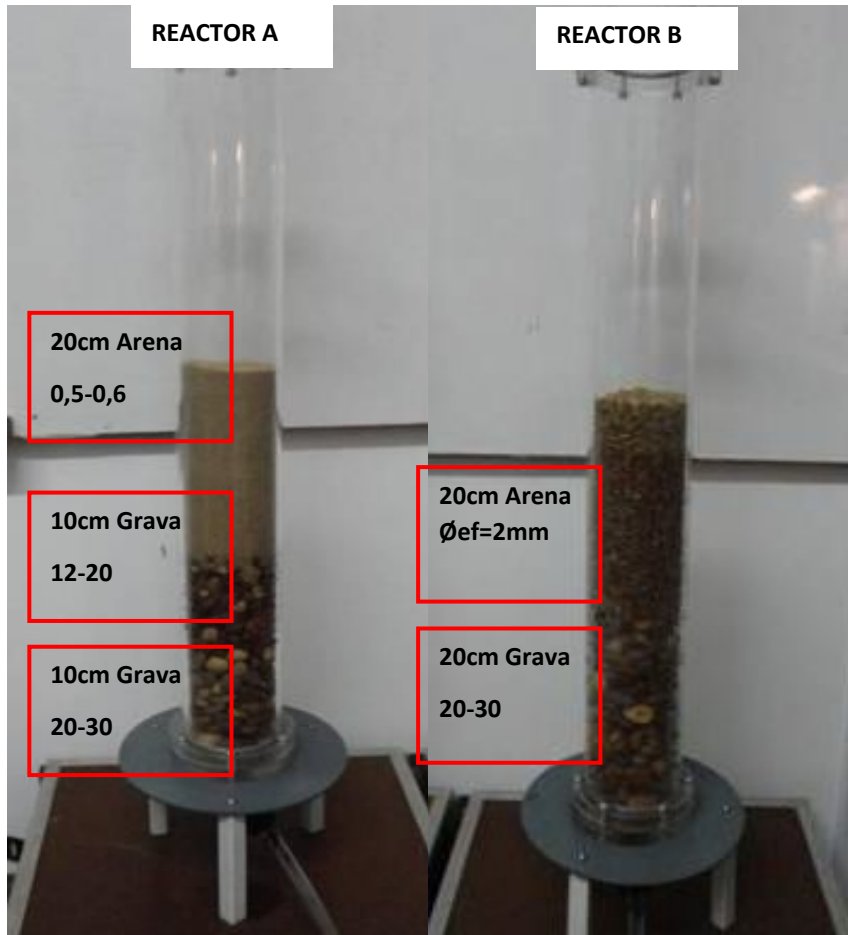


FIGURA 37: DETALLE MANTOS FILTRANTES REACTORES A Y B. ALTURA TOTAL DE LOS MANTOS 40CM.

9.1.2 Descripción de los ensayos realizados

A partir de las muestras extraídas de la planta potabilizadora de Villa Cañas, se comenzaron los ensayos. En primera instancia, se observó un gran contenido de humedad de las muestras debido a que el bombeo de barros y sobrenadante de la pileta se hace de forma simultánea como se indicó anteriormente. Es por esto que se concentran los barros eliminando la mitad del sobrenadante, quedando así dos muestras de 10 litros con el doble de contenido de sólidos totales que el que poseía la muestra original. (Ver Tabla 8).

TABLA 8: CARACTERIZACIÓN DE BARROS A EMPLEAR EN ENSAYOS

PLANTA POTABILIZADORA: VILLA CAÑAS BOMBEO DE BARROS	
SÓLIDOS TOTALES (mg/l)	% HUMEDAD
2800	99,7

En todos los ensayos se determinó el volumen de percolado y la turbiedad del mismo con una frecuencia diaria. En los ensayos se interrumpía la carga cuando se detectaba que la altura del sobrenadante era elevada, pero el volumen de percolado se continuaba midiendo luego de interrumpida la carga.

9.1.3 Ensayo 1: Reactores con distinta granulometría y caudal de percolado constante

En este primer ensayo se adoptó la metodología desarrollada por Carl Adams Jr. (ver ítem 8.3.1) que se aplica para el diseño de playas de secado de plantas de tratamiento de líquidos cloacales.

Como se explicó con anterioridad, esta metodología consiste en realizar un ensayo experimental con el objeto de determinar el contenido de sólidos en las diferentes etapas del secado, determinando experimentalmente las tasas de evapotranspiración de las fases a velocidad constante (infiltración) y de velocidad decreciente (evapotranspiración).

Al inicio del ensayo I se observó que al colocar el barro en el reactor B, este percolaba a través del manto con gran turbiedad. (Reactor A 150 NTU-Reactor B: 215 NTU). Esto fue debido a que la granulometría del reactor B era mayor que la del reactor A. A partir de esto, se decidió que los dos reactores tuvieran la misma granulometría igual al reactor A.

9.1.4 Ensayo 2: Reactor A y B con igual granulometría y caudal de percolado variable

En esta etapa se realizaron algunas modificaciones a los reactores. Se cambiaron las válvulas inferiores que eran aguja por grifos de PVC, debido a que presentaban excesiva sensibilidad generando algunos inconvenientes en los ensayos.

En este ensayo se trabajó con los mantos filtrantes limpios, o sea que luego de terminado el ensayo se extraía la arena y la grava y se procedía a su lavado. Además de las modificaciones mencionadas, se incorporaron trozos de cerámicos sobre el manto de arena de modo de reproducir los ladrillos que poseen las playas de secado. Esto evita que la arena se mezcle con la capa de barro y permite retirar la muestra de forma más sencilla. (Ver **Figura 38**)



FIGURA 38: COLOCACIÓN DE CERÁMICOS

La única diferencia entre el reactor A y B fue la apertura inicial de la válvula de drenaje. Se propusieron como caudales iniciales de drenaje los siguientes: (Ver Tabla 9)

TABLA 9: CAUDAL INICIAL DE PERCOLADO

REACTOR	Qpercolado (ml/min)
A	12,5
B	312 (*)

(*) Este caudal se corresponde con la válvula inferior completamente abierta

En la **Figura 39** se pueden ver las modificaciones realizadas a los reactores:

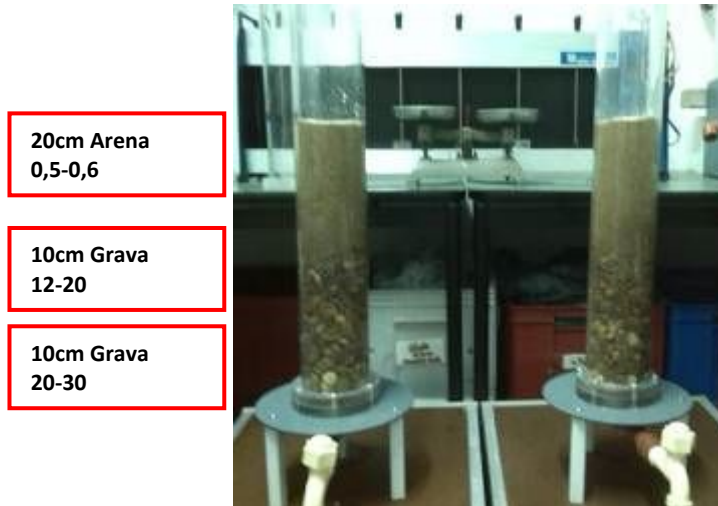


FIGURA 39: MODIFICACIÓN DE REACTORES

Los caudales de percolado no fueron elegidos de manera arbitraria, se propuso que la columna A tuviese una apertura media mientras que columna B tuviese la válvula completamente abierta. Este último caso simula lo que ocurre realmente en las playas de secado.

Las cargas de los reactores se realizó durante 10 días en el reactor A y 19 en el reactor B, con una carga diaria de 500 ml/día.

9.1.5 **Ensayo 3: Comportamiento de reactores con mantos filtrantes limpios y sucios**

Para poder comparar el comportamiento de las playas de secado en el caso de que un reactor posea los mantos limpios y el otro no, se procedió de la siguiente manera:

- **Reactor A:** Los mantos de arena y grava fueron removidos y lavados.
- **Reactor B:** Sólo se realizó el lavado de los cerámicos (que simulan los ladrillos de las playas) y un raspaje superficial del manto de arena a fin de remover la mayor cantidad de barro existente sobre la superficie.

En este caso, ambos reactores poseen la **misma granulometría, la misma carga (500ml/día) y el mismo caudal de percolado**. La válvula inferior de los reactores, permaneció totalmente abierta en ambas unidades durante el ensayo.

9.1.6 **Ensayo 4: Comportamiento de reactores con distintas cargas**

Debido a que los resultados obtenidos en el reactor B (Ensayo 3) no fueron satisfactorios, se interrumpió la carga del mismo. Se lavaron los mantos del reactor y se realizó un nuevo ensayo con diferentes cargas a

fin de evaluar la respuesta cada reactor. En este caso, en ambos reactores, la válvula inferior se dejó completamente abierta de modo de simular lo que ocurre realmente en las playas.

El **reactor A** se alimentó con una carga diaria de **500 ml, durante 12 días**. En cambio, **el reactor B** fue alimentado con una carga diaria de **250 ml por un período de 23 días**.

9.1.7 Ensayo 5: Aumento de tiempo entre cargas

Al evaluar los resultados obtenidos en el ensayo 4 se observó que el reactor que presentó resultados más favorables, fue el reactor B alimentado con **250ml/día** de barro

Como consecuencia, se decidió alimentar a los reactores con una carga de **500ml/día** ahora no diariamente si no cada 48 y 72 horas. En los ensayos realizados se observó que las playas se colmataban rápidamente por lo que el barro colocado no alcanzaba a percolar al cabo de 24hs. Cabe destacar, que lo que se pretende es que no exista sobrenadante entre carga y carga.

Los reactores conservaron su granulometría, modificándose únicamente el tiempo entre cargas. La válvula de drenaje permaneció completamente abierta.

El **reactor A** fue alimentado cada 48 horas, mientras que el **reactor B** fue cargado cada 72 horas. Se realizaron 11 cargas al reactor A y 10 al reactor B.

En la Tabla 10 se resumen las características de los ensayos realizados:

TABLA 10: RESUMEN DE ENSAYOS REALIZADOS EN LABORATORIO

Ensayo N°	Características de los mantos		Objetivo	Carga
	Reactor A	Reactor B		
1	<p>Arena 0,50-0,60 H=20cm</p> <p>Grava 12-20 H=10cm</p> <p>Grava 20-30 H= 10cm</p>	<p>Arena 2mm H=20cm</p> <p>Grava 20-30 H=20cm</p>	<p>Determinar tasa de infiltración y de evapotranspiración con dos granulometrias distintas.</p>	<p>Una sola carga de volumen tal que se alcanzara una altura de 50 cm inicial sobre los mantos</p>
2	<p>Arena 0,5-0,60 H=20cm</p> <p>Grava 12-20 H=10cm</p> <p>Grava 20-30 H= 10cm</p>	<p>Arena 0,5-0,60 H=20cm</p> <p>Grava 12-20 H=10cm</p> <p>Grava 20-30 H= 10cm</p>	<p>Operar con igual carga diaria. Mantener el Q percolado constante para cada reactor, pero con distintos valores entre ellos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reactor A: Qp=12,5ml/min • Reactor B: • Qp=312,0 ml/min 	<p>Carga diaria de 500 ml/día</p>
3.	<p>Arena 0,5-0,60 H=20cm</p> <p>Grava 12-20 H=10cm</p> <p>Grava 20-30 H= 10cm</p>	<p>Arena 0,5-0,60 H=20cm</p> <p>Grava 12-20 H=10cm</p> <p>Grava 20-30 H= 10cm</p>	<p>Evaluar el comportamiento de los reactores con los mantos limpios y sucios. Reactor A: Mantos limpios Reactor B: Mantos sin lavar</p>	<p>Carga diaria de 500 ml/día</p>
4	<p>Arena 0,5-0,60 H=20cm</p> <p>Grava 12-20 H=10cm</p> <p>Grava 20-30 H= 10cm</p>	<p>Arena 0,5-0,60 H=20cm</p> <p>Grava 12-20 H=10cm</p> <p>Grava 20-30 H= 10cm</p>	<p>Evaluar resultados al alimentar reactores con distintas cargas</p>	<p>Reactor A: 500ml/día</p> <p>Reactor B: 250 ml/día</p>
5	<p>Arena 0,5-0,60 H=20cm</p> <p>Grava 12-20 H=10cm</p> <p>Grava 20-30 H= 10cm</p>	<p>Arena 0,5-0,60 H=20cm</p> <p>Grava 12-20 H=10cm</p> <p>Grava 20-30 H= 10cm</p>	<p>Evaluar resultados al espaciar el tiempo entre carga y carga (48 y 72 hs)</p>	<p>Reactor A: 500 ml/48hs</p> <p>Reactor B: 500 ml /72hs</p>

9.2 Resultado y discusión de ensayos en laboratorio

A continuación, se presentan las gráficas que resumen los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados en los reactores a escala de laboratorio:

- **Ensayo 1**

En la **Figura 40** se muestran los valores de percolado tanto del reactor A como del reactor B medidos cada 24 hs. Cabe destacar que en este caso se realizó únicamente una carga tal que la altura del barro sobre el manto alcanzase los 50cm.

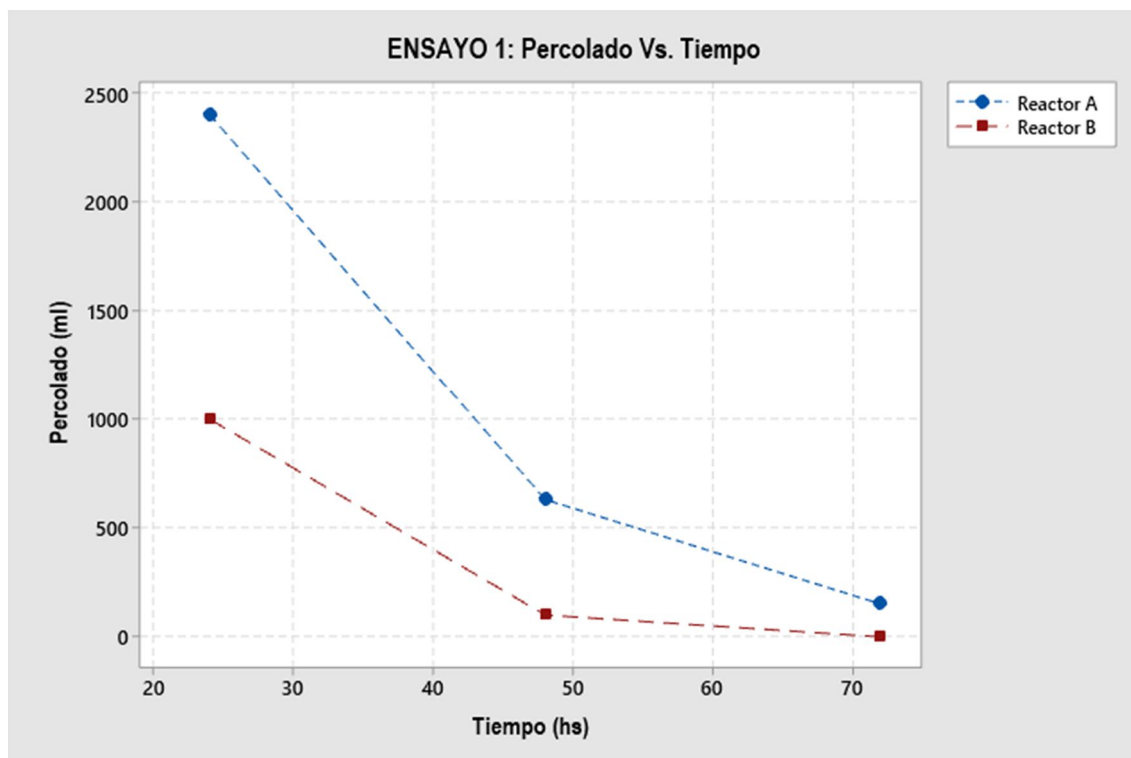


FIGURA 40: VARIACIÓN DEL PERCOLADO RESPECTO AL TIEMPO

En este caso la granulometría de los reactores era distinta (ver **Tabla 10**). Debido a esta diferencia era de esperar que el percolado en el reactor B fuese superior a la medida en el reactor A. A partir de los valores medidos en la **Figura 40** se observa que esto no ocurre. Esta situación, aparentemente fue producto de un problema en la válvula. Es por esto que no se pudo continuar el ensayo con el reactor B. En este caso al haber inconvenientes de tipo operativo los resultados obtenidos no son representativos.

Antes de comenzar el ensayo se tomó una muestra para evaluar el contenido de **humedad al inicio**, siendo la misma del **99.7%**.

En cuanto al reactor A, **luego de 72 horas** de haber tomado la última muestra de percolado, se procedió a retirar el barro del reactor y analizar el contenido de humedad, obteniéndose un **95.1%** de humedad en la fase inicial de evaporación. Este resultado indica que la fase de drenaje finalizó a los 3 días en coincidencia con lo establecido por Adams (ver punto 8.3.1).

Se procedió a retirar el barro del reactor, se colocó en un plato y se dejó al aire libre durante 3 días. Pasado este tiempo, el contenido de humedad en el barro fue de un **57.4%**.

NOTA: El secado al aire libre del barro se realizó en el mes de marzo.

En la **Figura 41** se observa el comienzo del ensayo, con una única carga tal que la altura sobre el manto fuera de 50cm.

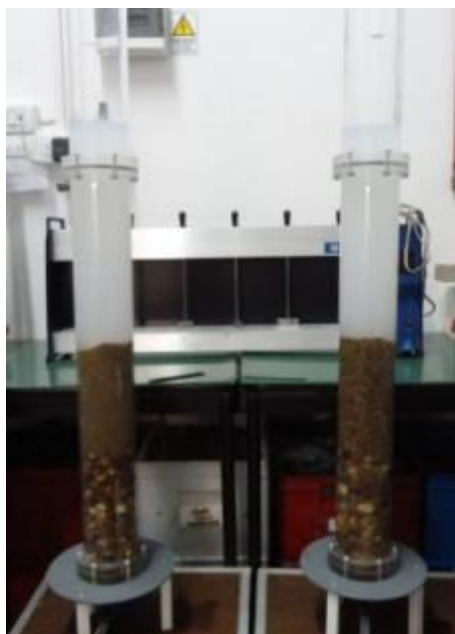


FIGURA 41: COMIENZO DEL ENSAYO

En la **Figura 42** se muestra la evolución del barro en el reactor pasadas 72hs o sea luego de la etapa de infiltración tal como la describe Adams -



FIGURA 42: BARRO EN REACTOR A, LUEGO DE 72 HS DE PERMANENCIA

- Ensayo 2

En la Figura 43 y Figura 44 se presentan las mediciones respecto a la turbiedad en percolado de los reactores A y B.

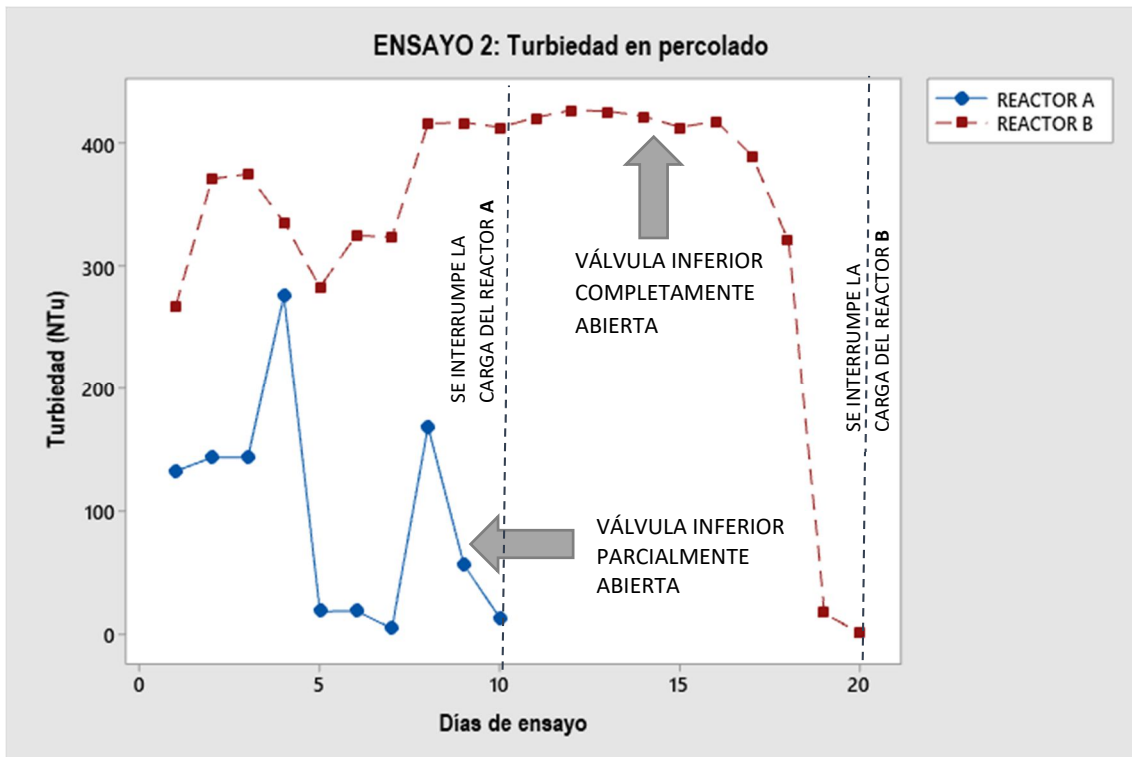


FIGURA 43: TURBIEDADES MEDIDAS EN PERCOLADO

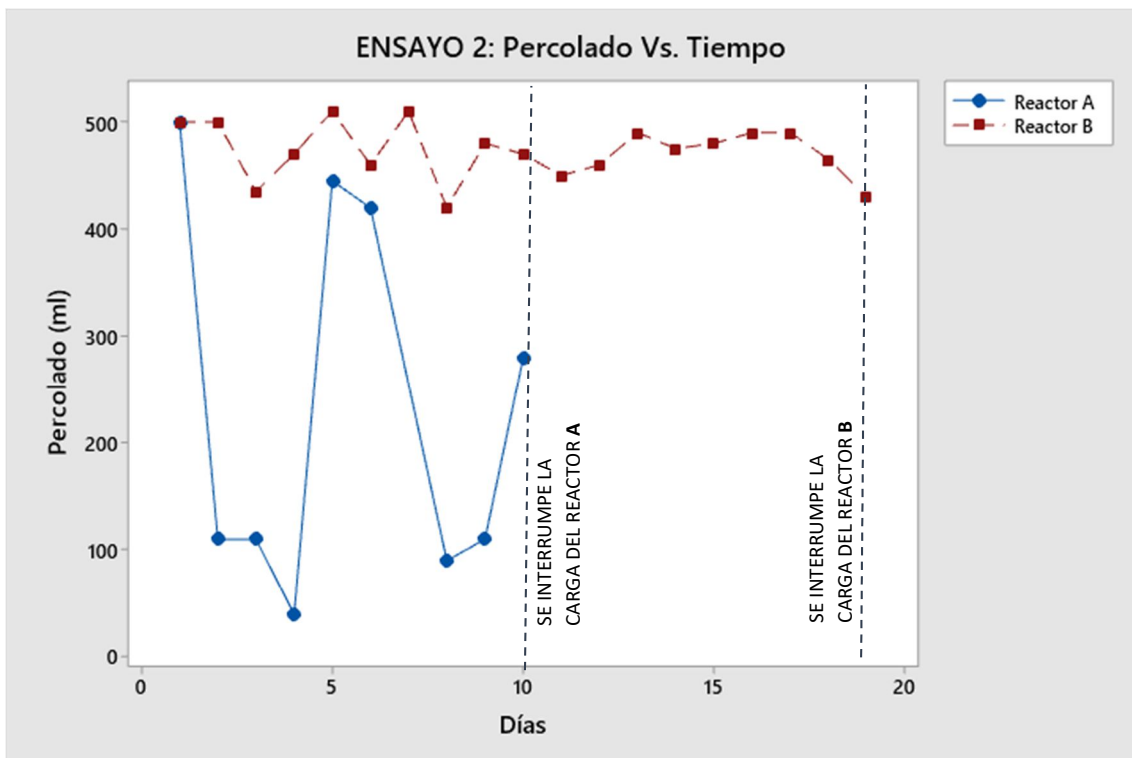


FIGURA 44: VARIACIÓN DEL PERCOLADO RESPECTO AL TIEMPO

Como se expuso en la **Tabla 10**, el reactor A poseía un caudal de percolado inicial de 12,5 ml/min mientras que el reactor B al tener la válvula inferior completamente abierta permitía un percolado de 312 ml/min.

Los resultados del reactor A tanto para percolado como para turbiedad son variables. Esto se corresponde con que la apertura de la válvula inferior se fue modificando a lo largo del ensayo para que el percolado permaneciese constante. Probablemente con cada apertura de la válvula se altera la disposición de los sólidos en el manto de arena. Como se observó que el drenaje del reactor A era demasiado lento, no alcanzando a percolar la carga en 24hs, se interrumpió el ensayo. Por esto sólo se continuó el ensayo con el reactor B para determinar en qué momento comienzan a acumularse sólidos.

Se observa que los resultados del reactor B son consistentes dado que el volumen de percolado es elevado y por lo tanto también lo son las turbiedades. Esto se debe a que la apertura de la válvula era total. Las turbiedades descienden significativamente en el día 19 lo que estaría demostrando una acción efectiva de filtrado por parte del lecho de arena.

Una vez finalizado el ensayo se retiró el barro de ambos reactores. Se tomó una muestra a fin de obtener el contenido de humedad al inicio de la fase de evaporación.

Luego se colocó el barro en dos recipientes para ser expuestos al aire libre durante 30 días y evaluar la evaporación.

El contenido inicial de humedad de la fase de evaporación se muestra en la **Tabla 11**.

TABLA 11 : HUMEDAD INICIAL Y FINAL, ETAPA DE EVAPORACIÓN.

HUMEDAD INICIAL %		HUMEDAD FINAL %	
REACTOR A	REACTOR B	REACTOR A	REACTOR B
91.3	93.3	18.2	19.3

NOTA: El secado al aire libre del barro se realizó en los meses de julio-agosto.

En las siguientes figura se muestra la evolución del ensayo, luego de una semana de carga. Se logra observar que el sobre la superficie del reactor A comienza a formarse la torta de barro mientras que en el reactor B aún no se disponen los sólidos (Ver **Figura 45**).



FIGURA 45: DÍA 7 DE CARGA: EL REACTOR A PRESENTA BARRO SOBRE LA SUPERFICIE, MIENTRAS QUE EN EL REACTOR B AÚN NO SE HA FORMADO LA TORTA DE BARRO

- **Ensayo 3**

En la **Figura 46** y **Figura 47** se representan los valores medidos de turbiedades y volúmenes de percolado para el reactor A y B. En este caso, la única diferencia entre los reactores fue que los mantos del reactor B no fueron lavados.

Ambas columnas fueron alimentadas con una carga diaria de 500 ml.

La columna A se alimentó por 12 días consecutivos. Una vez interrumpida la carga, se continuó midiendo el percolado hasta el día 22.

En cuanto al reactor B, el 4to día de ensayo se interrumpe la carga pues el percolado era insuficiente.

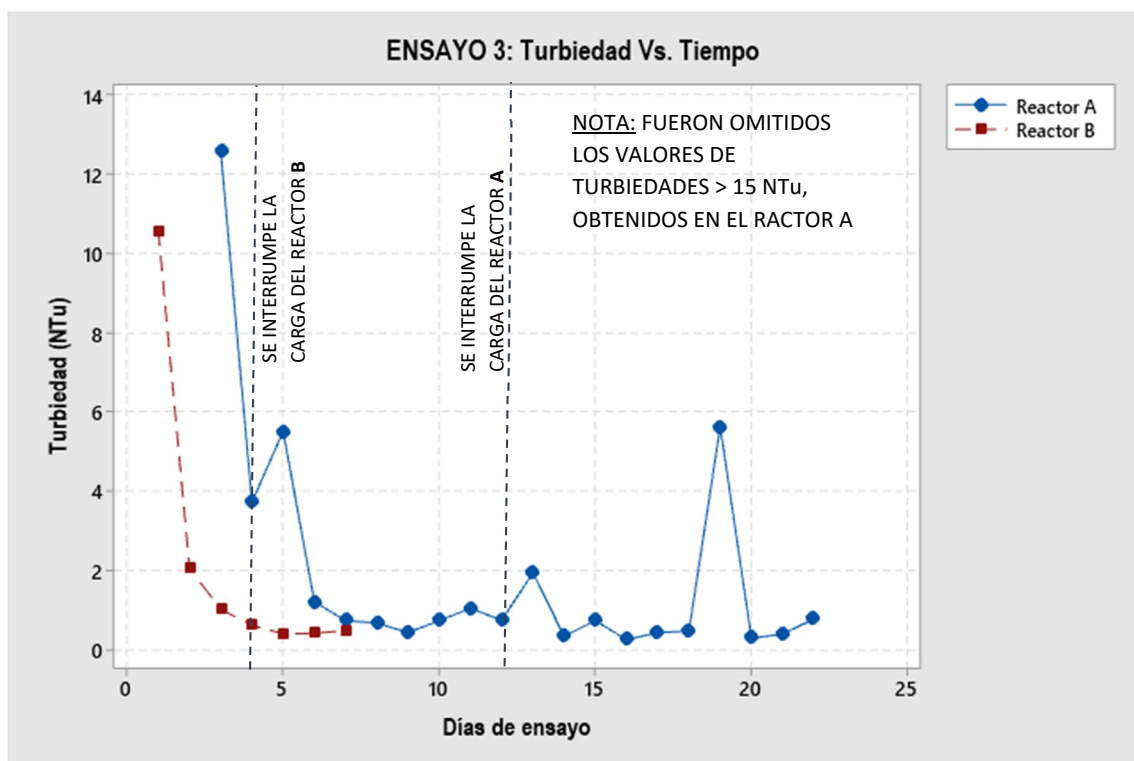


FIGURA 46: VARIACIÓN DE LA TURBIEDAD RESPECTO AL TIEMPO

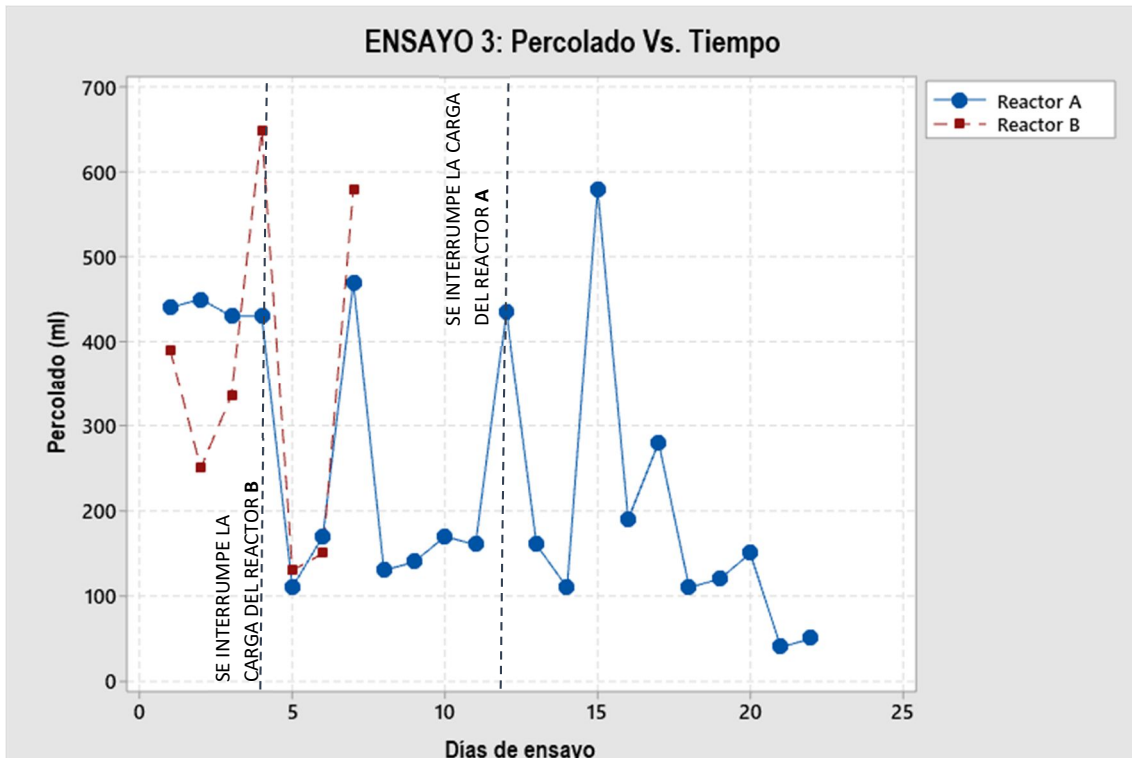


FIGURA 47: VARIACIÓN DEL PERCOLADO RESPECTO AL TIEMPO

A partir de las gráficas se puede observar que el reactor B se colmata luego del 4to día, a partir del cual los valores de turbiedad y percolado comienzan a disminuir. Esto indica que se obtienen, como era de esperar, mejores resultados con los mantos limpios. Sin embargo, no es factible remover los mantos y lavarlos en las playas de secado a escala real.

Cabe destacar que, si bien en la gráfica se presentan picos en los valores del percolado medido, los mismos no son representativos pues, los éstos se corresponden a la toma de muestra luego del fin de semana, ya que la carga se realizaba el día viernes y el día lunes se extraía la muestra.

Una vez finalizada la carga, el barro fue retirado del reactor y expuesto al aire libre por un período de 15 días para evaluar el contenido de humedad. A continuación, en la **Tabla 12**, se indican los valores de humedad inicial y final contenida en los barro.

TABLA 12: HUMEDAD INICIAL Y FINAL, ETAPA DE EVAPORACIÓN.

REACTOR	Humedad %	
	Inicial	Final
A	93	14
B	90	16

NOTA: El secado al aire libre del barro se realizó en el mes de septiembre.

En las siguientes figuras se muestra la evolución del ensayo:

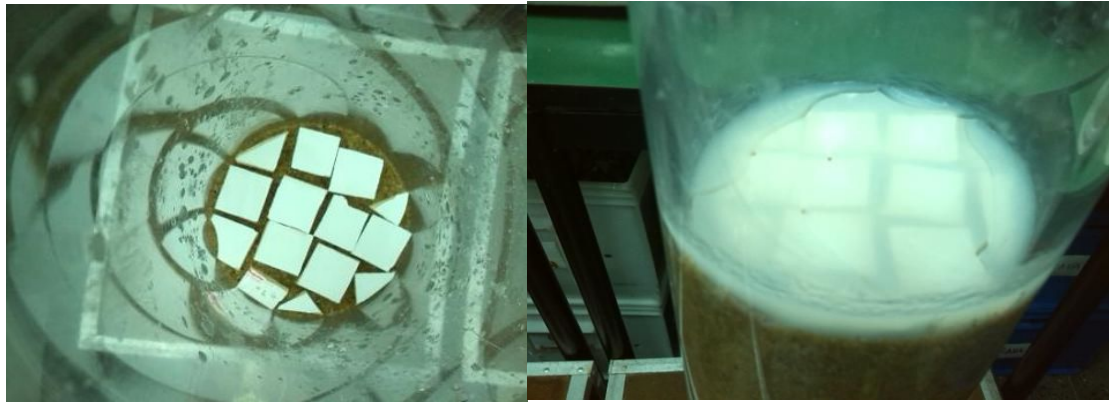


FIGURA 48: REACTOR A Y B RESPECTIVAMENTE AL INICIO DE LA CARGA. LA CARGA EN EL REACTOR A PERCOLA EN SU TOTALIDAD MIENTRAS QUE EN EL B COMIENZA A FORMARSE LA TORTA DE BARRO



FIGURA 49: REACTOR A Y B RESPECTIVAMENTE DURANTE EL 4TO DÍA DE ENSAYO. SE FORMA UNA PEQUEÑA CAPA DE BARRO EN EL REACTOR A MIENTAS QUE EN EL B LUEGO DE 24 HS. DE REALIZADA LA CARGA AÚN PRESENTA SOBRENADANTE

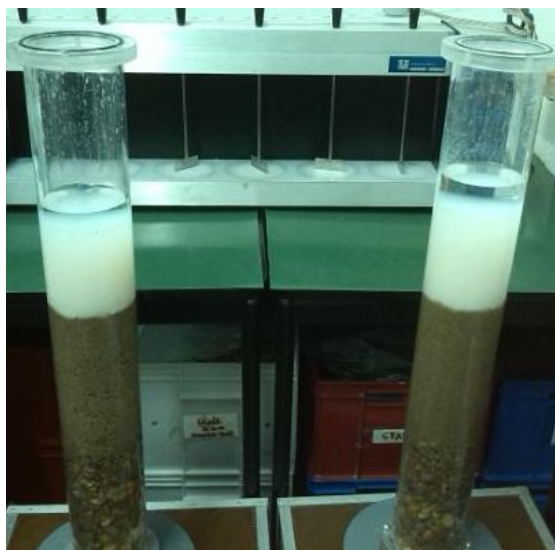


FIGURA 50: REACTOR A Y B RESPECTIVAMENTE DURANTE EL 7MO DÍA DE ENSAYO. AMBOS PRESENTAN SOBRENADANTE PERO SE OBSERVA QUE EL DEL REACTOR B ES MÁS ELEVADO QUE EL A.

- **Ensayo 4**

La columna A fue alimentada por 12 días consecutivos, con una carga diaria de 500 ml. Luego del día 12 se decidió interrumpir la carga pero se continuó midiendo diariamente el percolado.

El reactor B, cuyos mantos fueron retirados y lavados, fue alimentado durante 23 días, con una carga de 250 ml/día.

A continuación, en la siguiente gráfica se muestran los resultados de caudal de percolado y turbiedad durante el ensayo:

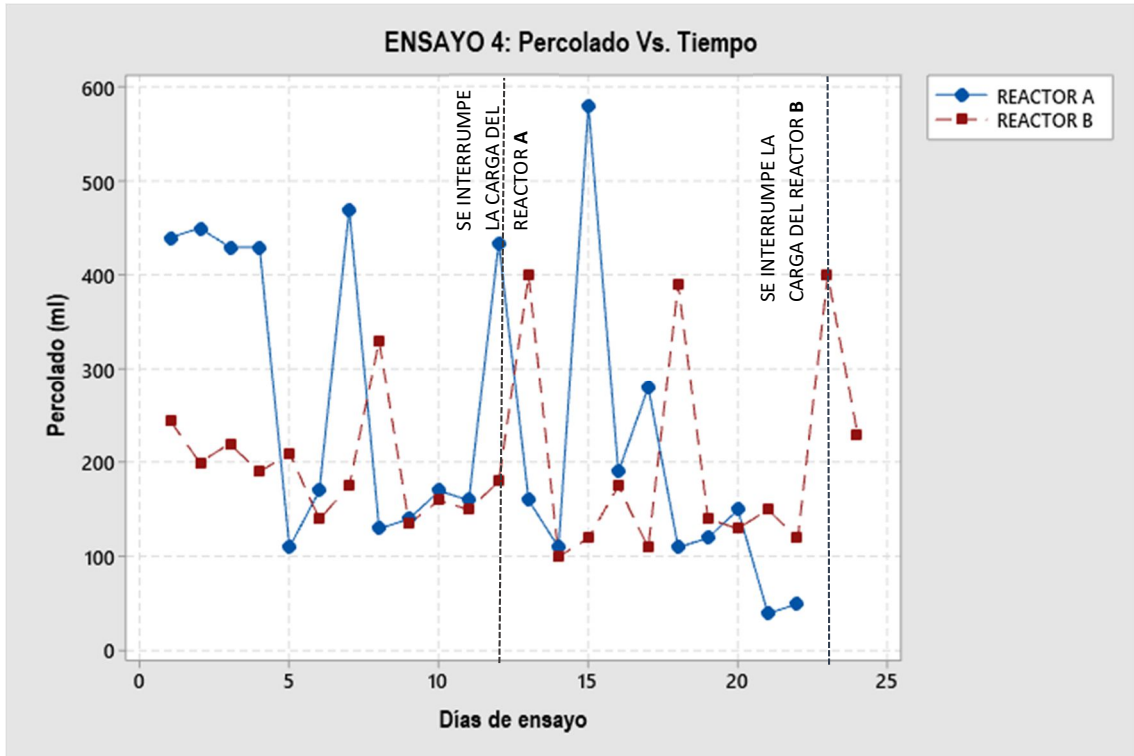


FIGURA 51: VARIACIÓN DEL PERCOLADO RESPECTO AL TIEMPO

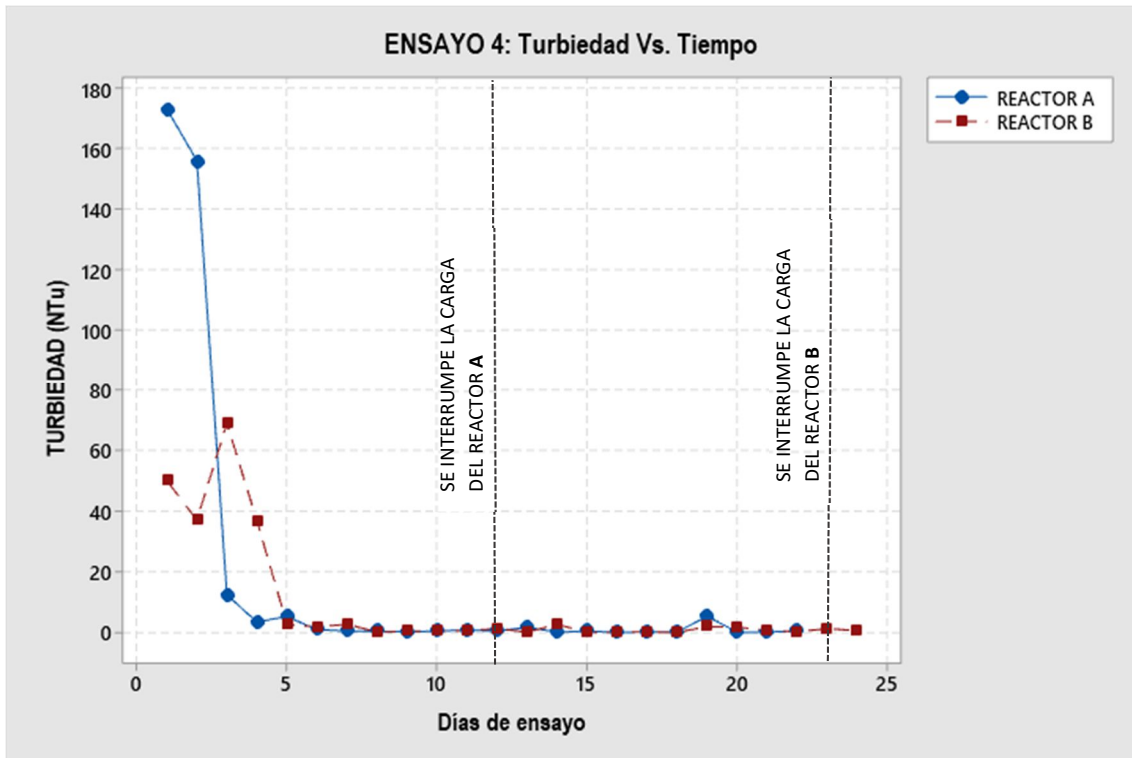


FIGURA 52: VARIACIÓN DE TURBIEDAD RESPECTO AL TIEMPO

Se observa que en el ensayo 4 al realizarse una carga de 250ml/día, permitió que el reactor funcionara por más tiempo (aproximadamente 23 días). Las gráficas tanto de Turbiedad Vs Tiempo como de Percolado Vs tiempo, presentan una tendencia pudiendo aproximarlas a una curva. Se puede deducir que reduciendo a la mitad la carga (de 500ml a 250ml), mejora el comportamiento notablemente.

Los barros de los reactores A, y B, una vez retirados fueron colocados en recipientes y expuestos al aire libre durante 15 días.

Se midió la humedad inicial y final en ambos casos.

A continuación, en la **Tabla 13** se muestran las humedades iniciales y finales.

TABLA 13: HUMEDADES INICIALES Y FINAL ETAPA DE EVAPORACIÓN

REACTOR	Humedad %	
	Inicial	Final
A	93	14
B	94	18

NOTA: El secado al aire libre del barro se realizó en el mes de septiembre-octubre.

A continuación, en las siguientes fotografías se muestra la evolución del ensayo.



FIGURA 53: Día 9—REACTOR A Y B RESPECTIVAMENTE (ETAPA DE CARGA) — EN AMBOS REACTORES APARECE SOBRENADANTE LUEGO DE LA CARGA, SIENDO MAYOR EN EL REACTOR A



FIGURA 54: Día 12—REACTOR A (ÚLTIMO DÍA DE CARGA)



FIGURA 55: Día 20—REACTOR B (ETAPA DE CARGA)

- **Ensayo 5**

En esta etapa se decidió alimentar a los reactores ahora no diariamente si no cada 48 y 72 horas. En los ensayos realizados previamente se observó que los mantos se colmataban rápidamente por lo que el barro colocado no alcanzaba a percolar al cabo de 24 horas. Cabe destacar, que lo que se pretende es que no exista sobrenadante entre carga y carga.

El **reactor A** fue alimentado cada 48 horas, mientras que el **reactor B** fue cargado cada 72 horas. En ambos casos la carga fue de 500 ml. El percolado se midió en el momento de la carga. En la **Figura 56** y **Figura 57** se muestra la variación del percolado y la turbiedad a lo largo del ensayo.

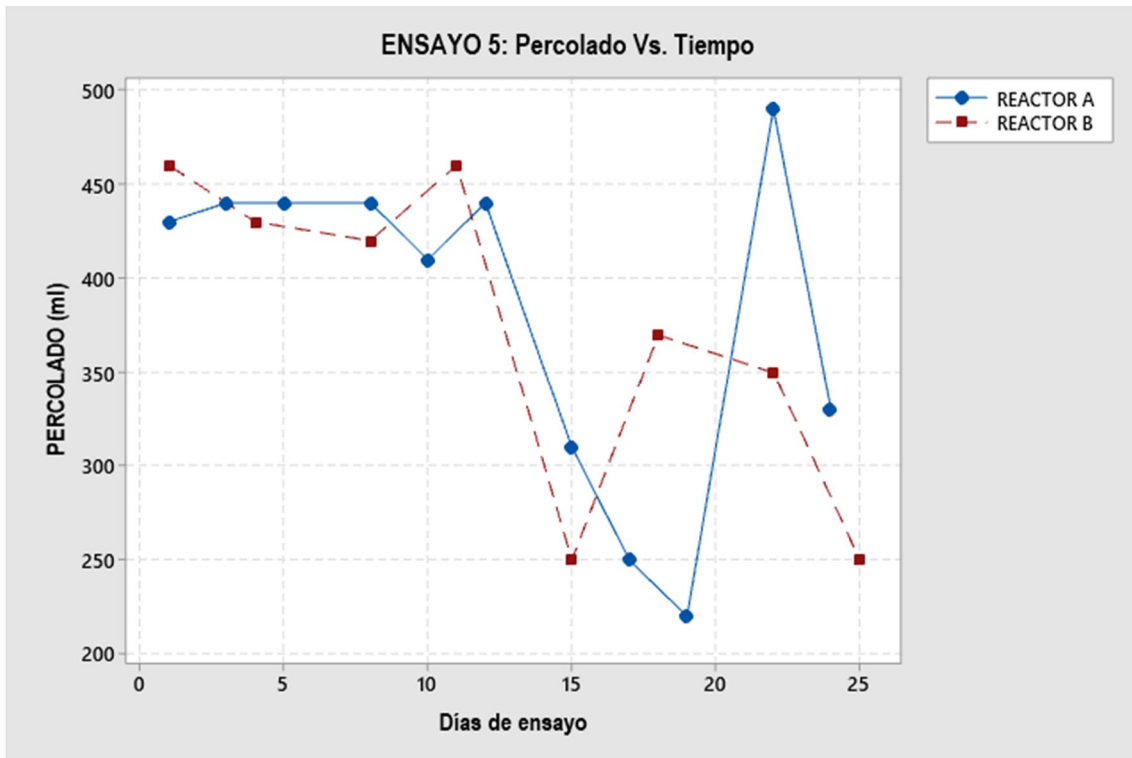


FIGURA 56: VARIACIÓN DEL PERCOLADO RESPECTO AL TIEMPO.

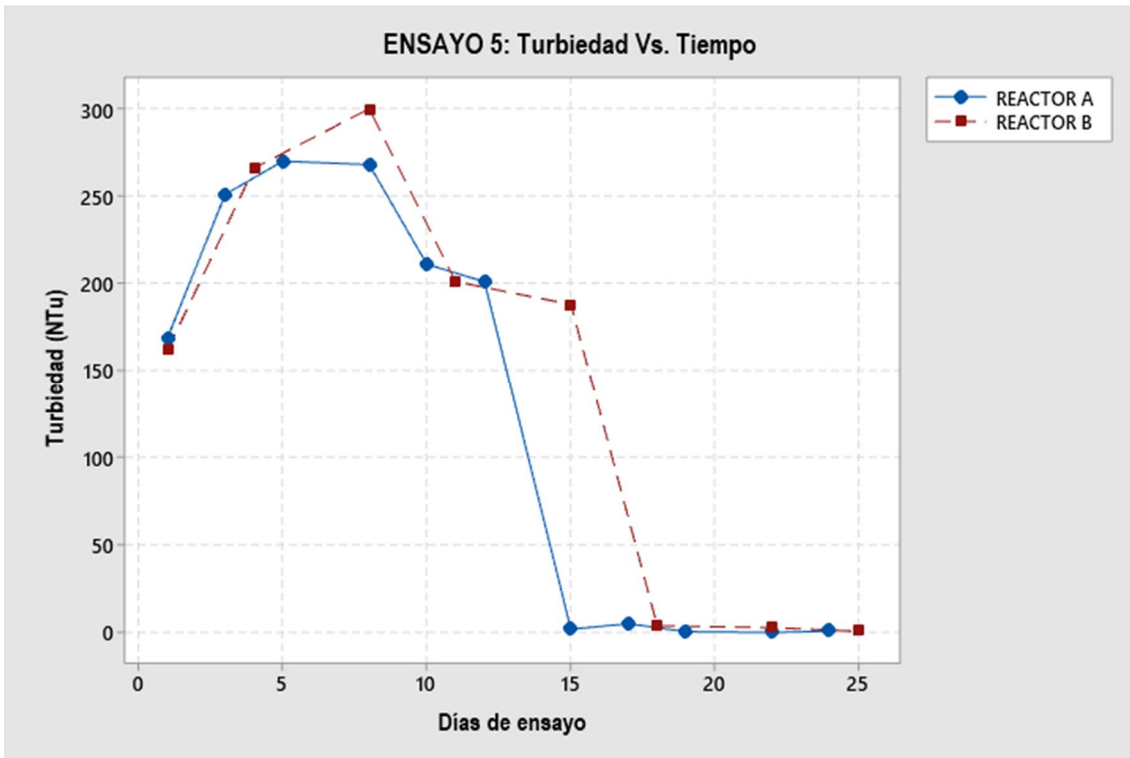


FIGURA 57: VARIACIÓN DE LA TURBIEDAD RESPECTO AL TIEMPO.

A continuación, en las siguientes imágenes se muestra la evolución del ensayo.



FIGURA 58: DÍA 9—REACTOR A Y REACTOR B RESPECTIVAMENTE (ETAPA DE CARGA). SE OBSERVA MAYOR CANTIDAD DE BARRO Y SOBRENADANTE EN LA COLUMNA A



FIGURA 59: DÍA 18– REACTOR A Y REACTOR B RESPECTIVAMENTE (ETAPA DE SECADO). EN AMBOS REACTORES SE FORMÓ LA TORTA DE BARRO, PERO SE APRECIA UN ESPESOR MAYOR EN EL REACTOR A.

9.3 Conclusiones

Al evaluar las gráficas obtenidas en los distintos ensayos, se observa que se obtuvieron mejores resultados con las siguientes condiciones.

- Ensayo 4: Reactor B, carga de 250ml cada 24 hs.
- Ensayo 5: Reactor A y B, carga de 500ml cada 48 hs y 72 hs. Respectivamente.

A partir de los ensayos realizados se puede deducir que, reduciendo a la mitad la carga (de 500ml a 250ml), mejoró el comportamiento en los reactores.

Se puede concluir que en las condiciones en que se realizaron los ensayos al cabo de 30 días en proceso de secado se obtienen valores en 14 y 18 % de humedad.

Uno de los parámetros que se utilizan para diseñar las playas de secado es la carga de sólidos expresada en kg de sólidos por metro cuadrado y por año.

A partir de los resultados de los ensayos y tomando un valor de sólidos totales en el barro bombeado a las playas de **2800 mg/L (Tabla 8)** se calculó cual sería en una primera aproximación una carga recomendable:

- Si se recomienda una carga de **250ml/día**, los sólidos totales aplicados serán de **700mg/día**. Por lo tanto la carga aplicada por m^2 será: **$0,089 \text{ kg}/m^2 \cdot \text{día} = 32,5 \text{ kg}/m^2 \cdot \text{año}$** .
- Si se realizan los mismos cálculos teniendo en cuenta que a la laguna de secado se bombean **9.00 m³/día** (como ocurre en las lagunas de Villa Cañás), el valor de carga de sólidos es similar. (**$0.087 \text{ kg}/m^2 = 31.65 \text{ kg}/m^2 \cdot \text{año}$**). Aunque el proceso en las playas es distinto al que ocurre en las lagunas de secado, un valor de aproximadamente **30kg/m²·año** puede ser indicativo.

Según la bibliografía (David A. Cornwell Ph.D, P.E. et all, 1999), las playas de secado son muy específicas del lugar en el cuál estén situadas y del tipo de planta del cual traten el residuo, pero tienden a tener un rango de entre 50 hasta 150kg/m²·año. Los resultados de los ensayos estarían indicando que las cargas para este caso particular, por el tipo de barro generado en las plantas ArCis-UNR®, serían menores.

Los resultados de los ensayos en laboratorio permiten obtener información sobre los procesos de deshidratación de los barros, pero hay que tener en cuenta que se realizan en condiciones distintas de las que ocurren en la realidad. Los ensayos durante la operación se realizaron en un lugar cerrado donde no reciben la acción del sol y para el secado al aire libre se utilizó un pequeño volumen de muestra.

Es por ello que se decidió realizar ensayos a nivel de planta piloto los que se describen a continuación.

10. REACTORES A ESCALA PILOTO

10.1 *Diseño de reactores*

Una vez realizados los ensayos en laboratorio, se diseñaron y construyeron dos reactores a escala piloto, uno con techo y otro sin techo, que fueron instalados en la planta potabilizadora de Villa Cañas. Los objetivos de los ensayos fueron:

- Trabajar en condiciones similares a las que se producen en las playas de secado a escala real,
- Determinar las ventajas de utilizar una cubierta policarbonato que permitiera evitar el ingreso de agua de lluvia y aprovechar mejor la energía solar.

Para su construcción se utilizaron dos cubas de polipropileno de 350 litros, con las siguientes dimensiones: 1,07 m (largo) x 0,54 m (ancho) x 0,64 m (alto). Se colocó en la parte inferior un caño de PVC perforado que funciona como dren para coleccionar el agua contenida en los barros, en cuyo extremo se instaló una válvula esférica para permitir el drenaje del percolado.

Para los mantos filtrantes se conservó el esquema utilizado en los reactores en laboratorio:

- 20 cm de arena 0,5-0,6
- 10 cm de grava 12-20
- 10cm de grava 20-30

En las siguientes figuras se muestra el proceso de armado de las playas:



FIGURA 60: PROCESO DE ARMADO DE LAS PLAYAS-MANTOS INFERIORES DE GRAVA



FIGURA 61: PROCESO DE ARMADO DE LAS PLAYAS-MANTOS SUPERIOR DE ARENA Y TEJUELAS

La única diferencia que poseen las playas experimentales es que a una de ellas se le incorporó una cubierta de policarbonato de modo de aprovechar la radiación solar y evitar la entrada de agua de lluvia.

A continuación, en **Figura 62** se muestra un esquema de las playas con cubierta de policarbonato:

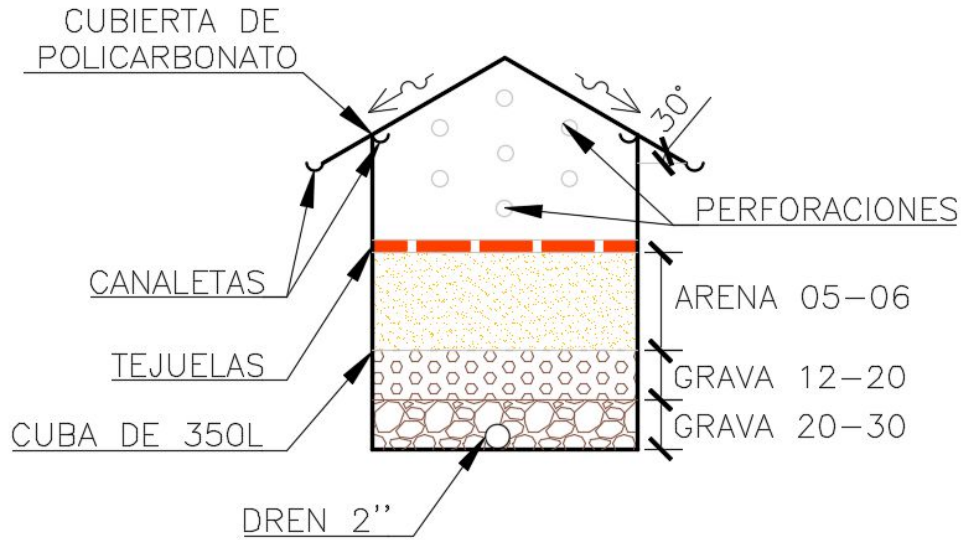


FIGURA 62: ESQUEMA PLAYAS DE SECADO A ESCALA PILOTO

Este prototipo posee un techo solar a dos aguas con techo y laterales de policarbonato, soportado por cuatro parantes sujetos a la cuba. Se colocaron dos canaletas interiores con la idea de recoger el agua que se condensa para conducirla a un recipiente mediante mangueras. Otras dos canaletas exteriores se colocaron para recoger el agua de lluvia. Así mismo, se construyó un acceso frontal, para inspeccionar el interior, tomar muestras y medidas de temperatura. En esta pared frontal se hicieron perforaciones para favorecer la entrada de aire.

Se colocó un termómetro digital en cada una de las playas (marca Testo, modelo mini data logger. (Ver **Figura 63**)



FIGURA 63: TERMÓMETROS DIGITALES

Se incorporó un tubo de una pulgada conectado al dren inferior de las playas, de modo de evitar que se generen presiones negativas en los mantos.

Además, se colocó un pluviómetro en las inmediaciones de las playas con el fin de registrar las precipitaciones. En la **Figura 64**, se muestra una fotografía del pluviómetro instalado.



FIGURA 64: PLUVIÓMETRO INSTALADO EN LAS INMEDIACIONES DE LA PLANTA.

10.2 Ensayos

10.2.1 Ensayo 1: Período septiembre- noviembre

El barro bombeado hacia las lagunas suele estar muy diluido, pues se bombea de modo simultáneo con el sobrenadante que es recirculado a la planta de tratamiento, como ya se indicó. Es por ello, que se decidió implementar dos tanques de 75 litros en los cuales se agregó el barro que se envía a las lagunas de secado. El barro se dejaba sedimentar por 24 horas, con el objetivo de espesarlos por gravedad, se extraía el sobrenadante y el concentrado se utilizaba para cargar las playas. La carga de las playas fue de 23 litros/día.

Este ensayo se realizó durante los **meses de septiembre y noviembre del año 2017**. La carga se realizó de manera diaria por un período de 32 días. Pasado este tiempo, se interrumpió la alimentación iniciándose el proceso de secado, el cual se extendió por 34 días, por lo que la experiencia tuvo una duración total de 66 días.

En la siguiente fotografía (**Figura 65**) se muestran las playas de secado, ubicadas en proximidades de la pileta de recuperación. En la fotografía se pueden observar los tanques de 75 litros que alimentan las playas, así como también bidones de 20 litros donde se colecta el percolado.

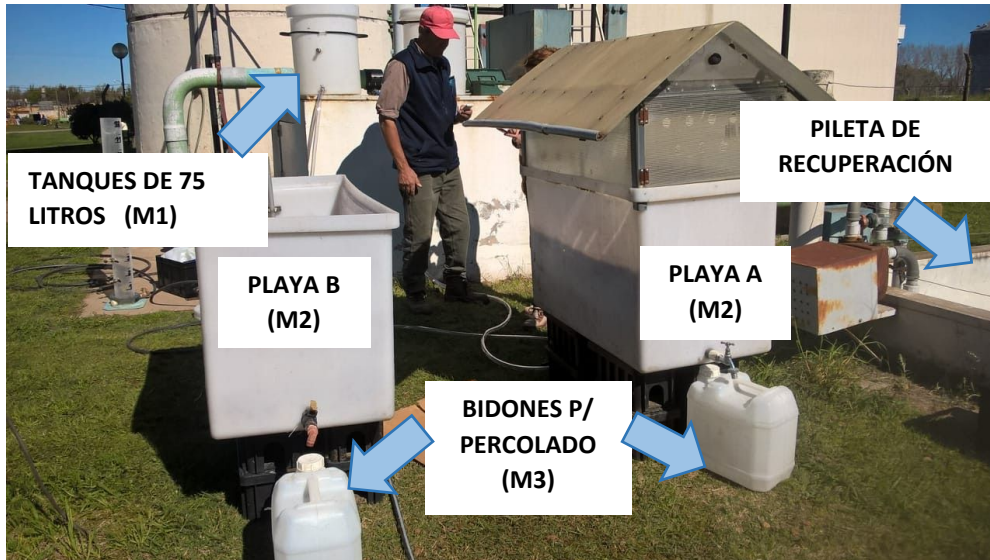


FIGURA 65: PLAYAS DE SECADO EN PREDIO DE PLANTA POTABILIZADORA, VILLA CAÑÁS.

10.2.1.1 Puntos de muestreo

Durante la operación de las playas se planteó el siguiente esquema de muestreo:

- Tanque de 75 litros (M1)
- Playas de secado (M2)
- Bidones de 20 litros (M3)

Siendo:

M1: barro con el que se alimentó a las playas. Antes de cargar la playa, se tomó una muestra en un envase de 250ml.

M2: durante el período de secado se tomaron muestras de distintos puntos de la playa, colectándola en pote plástico de 500cm³.

M3: medición del volumen de percolado recolectado una vez por día en el bidón de 20 litros y medido con una probeta de un litro.

Según el punto de muestreo fueron realizadas las siguientes determinaciones: (Ver **Tabla 14**)

TABLA 14: DETERMINACIONES SEGÚN LOS PUNTOS DE MUESTREO

PARÁMETRO	MUESTRA		
	M1	M2	M3
SÓLIDOS TOTALES	X		X
TURBIEDAD			X
HUMEDAD		X	
ALUMINIO			X
ARSÉNICO			X

10.2.1.2 Registro de temperatura, volumen de percolado y precipitaciones

Los termómetros instalados en las playas, permitieron registrar las temperaturas cada una hora. Se determinaron los valores máximos y mínimos en cada playa durante el día. A partir de estos datos se elaboraron las siguientes figuras:

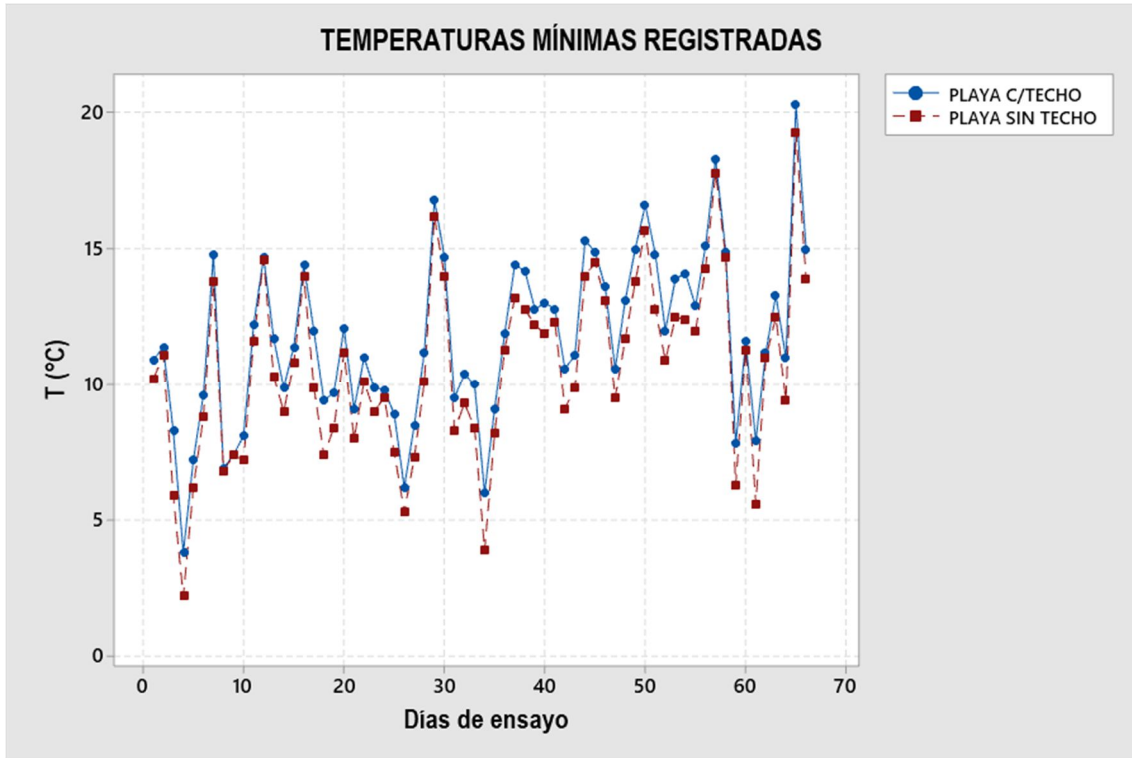


FIGURA 66: TEMPERATURAS MÍNIMAS REGISTRADAS DURANTE LA EXPERIENCIA EN AMBAS PLAYAS

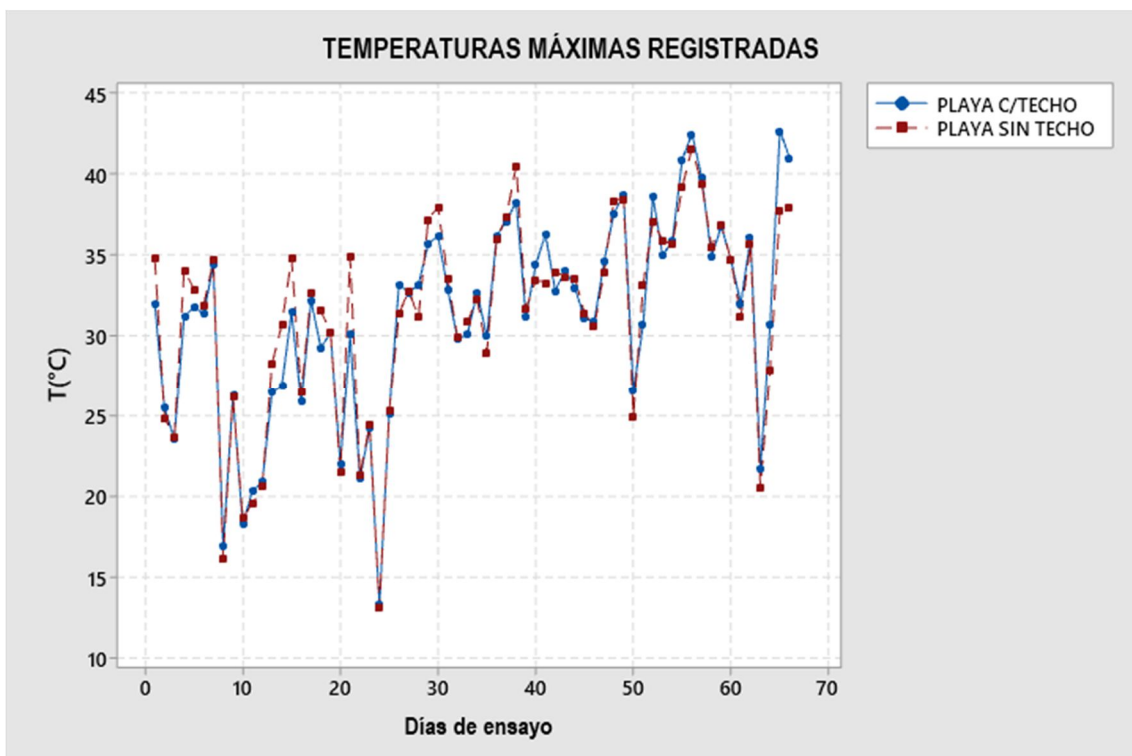


FIGURA 67: TEMPERATURAS MÁXIMAS REGISTRADAS DURANTE LA EXPERIENCIA

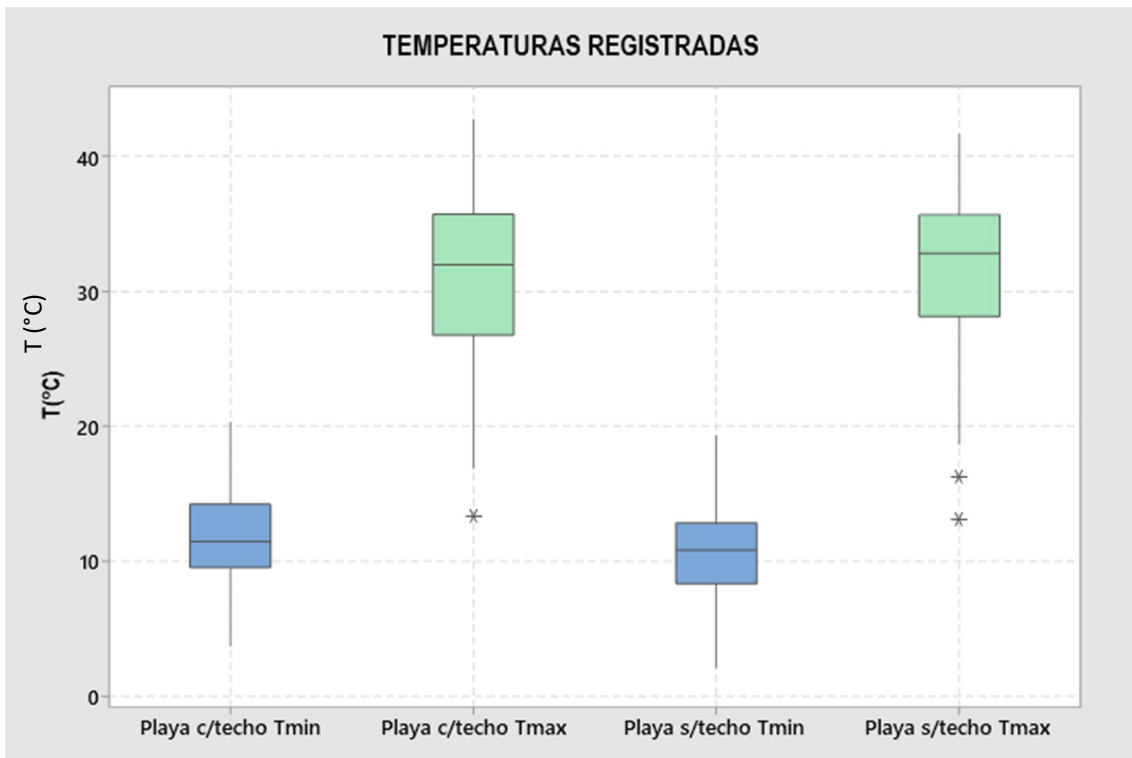


FIGURA 68: BOXPLOT, CORRESPONDIENTE A TEMPERATURAS DIARIAS REGISTRADAS

Los rangos de temperatura registrados se encuentran entre los 3.8° y los 42.7° C para la playa con cubierta y entre los 2.20°C y los 41.6°C para la playa sin techo.

Al analizar las temperaturas mínimas se observa que las de la playa con techo se encuentran levemente por encima de la playa sin cubierta. Así mismo, los valores registrados en la playa con cubierta son más dispersos.

En cuanto a las temperaturas máximas, la mayoría de los valores se solapan no existiendo una diferencia significativa entre las playas.

El hecho de que no haya diferencias significativas en las temperaturas en ambas playas se podría atribuir a errores en el diseño de la cubierta de policarbonato en la planta con techo, ya que como se indicó en el punto 7.3.2 es necesario asegurar una buena ventilación y circulación de aire para que no se produzca condensación del vapor generado por la acción del sol y esa ventilación si es excesiva hace que la temperatura en el interior del reactor se asimile a la temperatura ambiente .

A lo largo de toda la carrera se midió el volumen de percolado que escurría en ambas playas, correspondientes al punto de muestreo M3. Los valores registrados pueden observarse en la **Figura 69**.

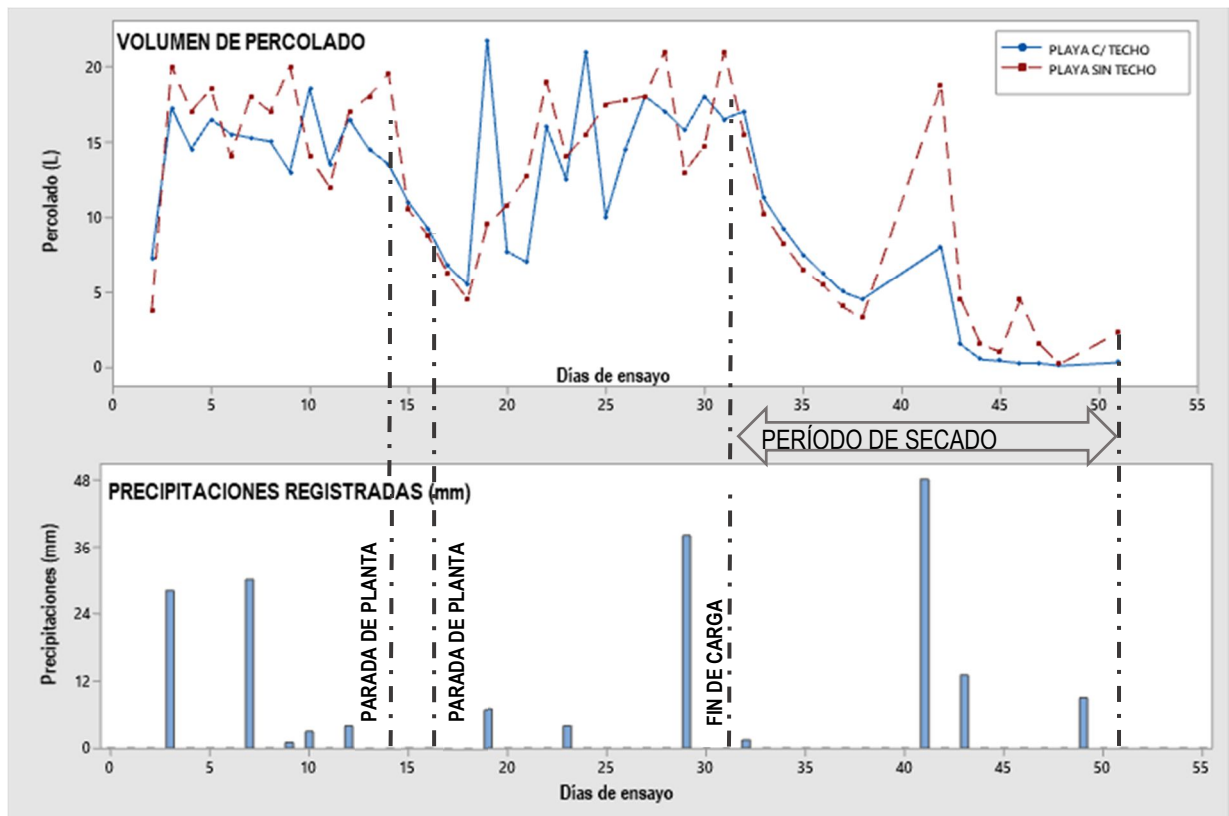


FIGURA 69: VOLUMEN DE PERCOLADO DE AMBAS PLAYAS Y PRECIPITACIONES DURANTE LA DURACIÓN DEL ENSAYO

En el gráfico se indican con líneas de trazos dos eventos ocurridos durante la experiencia. A la izquierda se indica una interrupción involuntaria de la carga de barro producto de una parada de la planta potabilizadora (días de 14,15 y 16) y la de la derecha marca (día 32) indica el cese de la carga de la playa para dar comienzo a la etapa de secado.

Como se observa, la carga se realizó durante 32 días. Si bien los volúmenes de percolado para ambas playas son muy similares, puede apreciarse una tendencia de un mayor percolado en la playa sin cubierta en coincidencia con las precipitaciones.

El volumen promedio de percolado es de 14 litros para la playa con cubierta solar y 15 litros para la playa descubierta.

A continuación, en la **Figura 70** se muestra la superficie del barro en ambas playas durante el proceso de carga. En ambas playas, se observa el inicio de la formación de canales preferenciales de escurrimiento que a futuro se convertirán en grietas.



FIGURA 70: Día 14 DE OPERACIÓN, PREVIO A LA CARGA DEL BARRO

Durante los tres días que la playa no fue alimentada, debido a la parada de la planta potabilizadora, se produjo una disminución en el volumen de percolado de ambas playas. Al continuar la carga, la playa sin techo presentó un mayor volumen de percolado. Este hecho puede atribuirse tanto a las precipitaciones como a la presencia de mayor cantidad de canales de escurrimiento sobre la superficie del barro sin cubierta. Esta situación puede observarse en la **Figura 71** .



FIGURA 71: DÍA 17 DE OPERACIÓN, PREVIO A LA CARGA DEL BARRO

En la **etapa de secado** se interrumpe la carga de las playas. Como se puede observar en la **Figura 69**, al comienzo de la fase de secado el volumen de percolado de la playa con techo es levemente superior al de la playa sin techo. El día 42, se produce una lluvia (48mm) que genera un incremento notable en el percolado de la playa sin cubierta. Esta situación se mantiene hasta el final de la etapa de secado, pudiendo atribuirse este hecho a las precipitaciones ocurridas. El promedio de los volúmenes de percolado para la playa sin techo es de 6 litros y para la con techo es 4 litros.

10.2.1.3 Determinación de As, Al y turbiedades en percolado (M3)

Una vez por semana se determinó el contenido de As y Al en el volumen de percolado de cada una de las playas, así como también la turbiedad. Estas determinaciones se realizaron teniendo en cuenta que el percolado de las playas se recircula a la planta de tratamiento A continuación en la **Tabla 15** se detallan los valores obtenidos:

TABLA 15: AS, AL, Y TURBIEDAD EN PERCOLADO.

DÍA DE ENSAYO	PLAYA CON TECHO			PLAYA SIN TECHO		
	As (µg/L)	Al (mg/L)	TURBIEDAD (UNT)	As (µg/L)	Al (mg/L)	TURBIEDAD (UNT)
6	49.89	< 0.04	0.29	59.89	< 0.04	0.47
14	34.36	< 0.04	0.70	70.97	1.70	1.30
20	44.37	0.87	0.63	91.80	1.20	0.76
26	36.78	0.51	0.13	84.59	0.73	0.28
31	95.88	3.90	2.89	135.90	84.00	54.00
38	57.85	0.26	0.25	158.90	1.80	0.41
46	70.13	0.33	1.08	173.50	1.70	0.45
51	97.68	3.10	N.D	190.50	4.50	N.D

Nota: N.D. no determinado

Como se puede observar a partir del día 31 se incrementan los valores de turbiedad, arsénico y aluminio en ambas playas, siendo más altos en la playa sin techo. Ello puede deberse a la formación de grietas en ambas playas que podrían favorecer el arrastre de turbiedad y arsénico, y particularmente, en la playa sin techo a la influencia de las precipitaciones.

En las **Figura 72** se puede observar que existe una relación entre los valores de As y Al en el percolado tal como se había determinado para el efluente de las plantas basadas en el proceso ArCIS-UNR® (González et al, 2016)

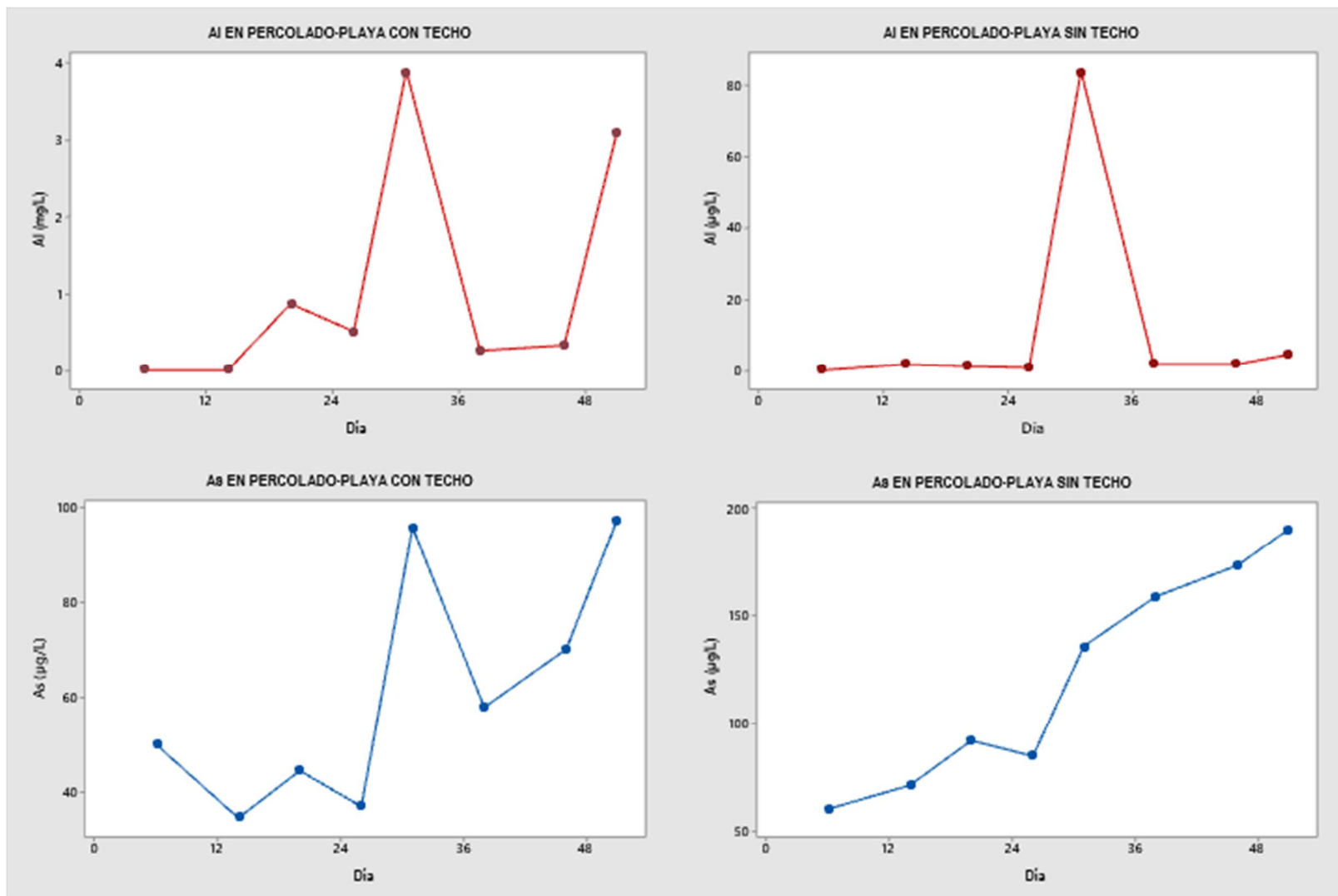


FIGURA 72: DETERMINACIÓN DE AS, AL Y TURBIEDADES EN PERCOLADO (M3)

10.2.1.4 Sólidos totales (M1 y M3)

El análisis de sólidos totales se realizó en dos puntos: uno en los barros con el que se alimentó las playas una vez sedimentado por un período de 24 horas (**M1**) y otro en el percolado de las playas (**M3**). A continuación, en la **Figura 73** se indican los S.T. en el barro que alimenta a las playas.

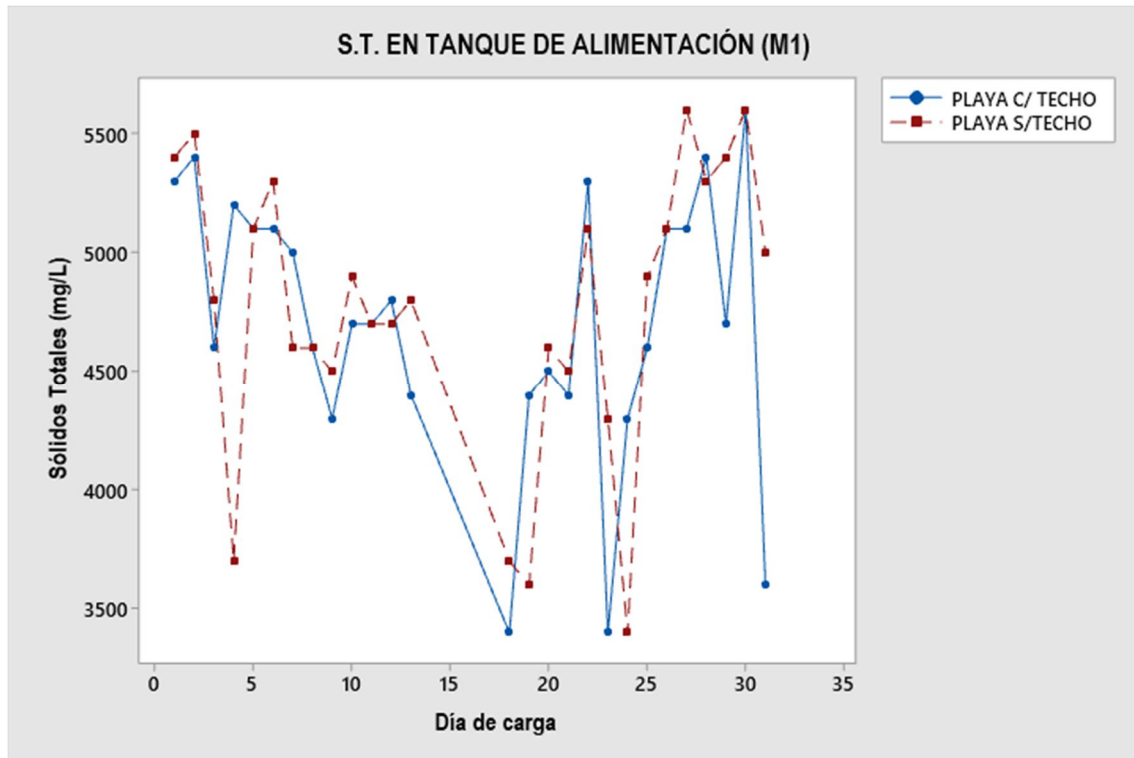


FIGURA 73: SÓLIDOS TOTALES EN TANQUES DE ALIMENTACIÓN

Se puede apreciar en la gráfica, que en general los valores de sólidos totales del barro de carga son similares en ambas playas, solapándose en algunos puntos. Esto se debe a que el barro para las playas proviene de la misma pileta de recuperación. No obstante, los valores fueron variables debido a que los contenidos de sólidos totales en la pileta de recuperación también son variables. El promedio de sólidos totales se halla en 4704 mg/l para la playa con techo y 4766 mg/l para la playa sin cubierta.

En las gráficas siguientes (**Figura 74** y **Figura 75**) se indican los valores medidos de volumen y S.T. en el percolado en el período de carga.

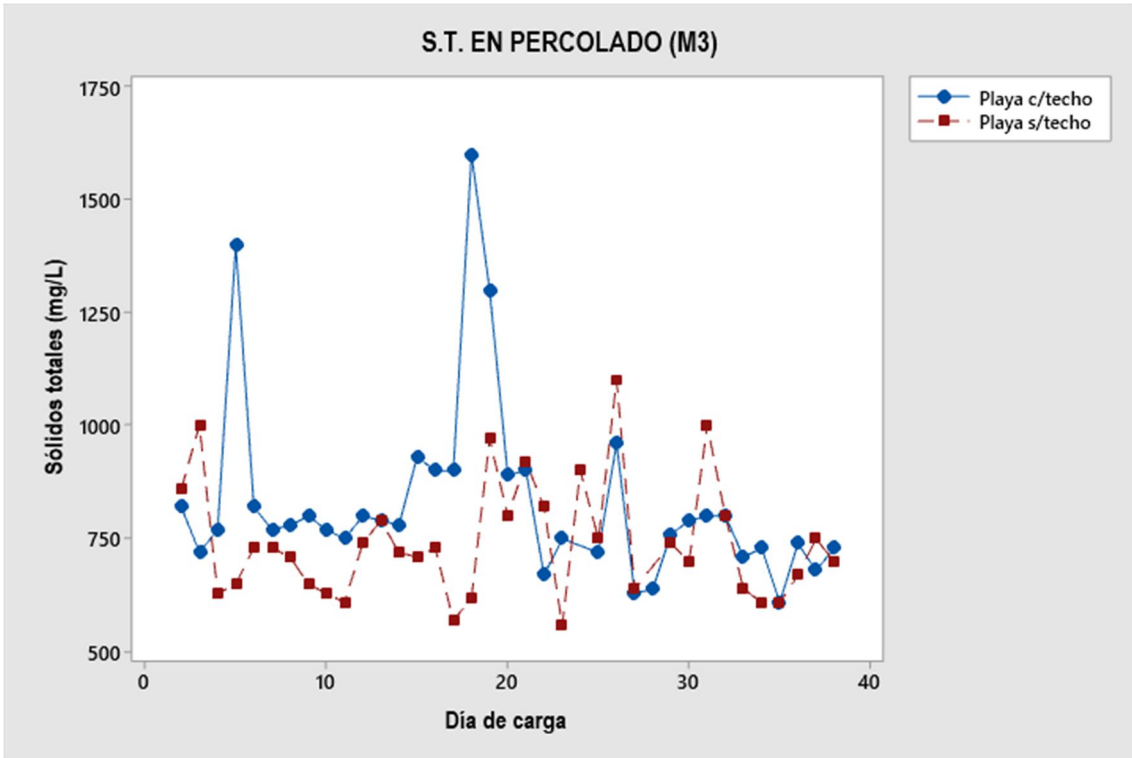


FIGURA 74: SÓLIDOS TOTALES EN PERCOLADO

NOTA: No se indican en la gráfica precedente dos puntos considerados atípicos (outliers) que indicaban valores mayores a 3500 mg/L el día 24 (para la playa sin techo) y 28 (para la playa con techo).

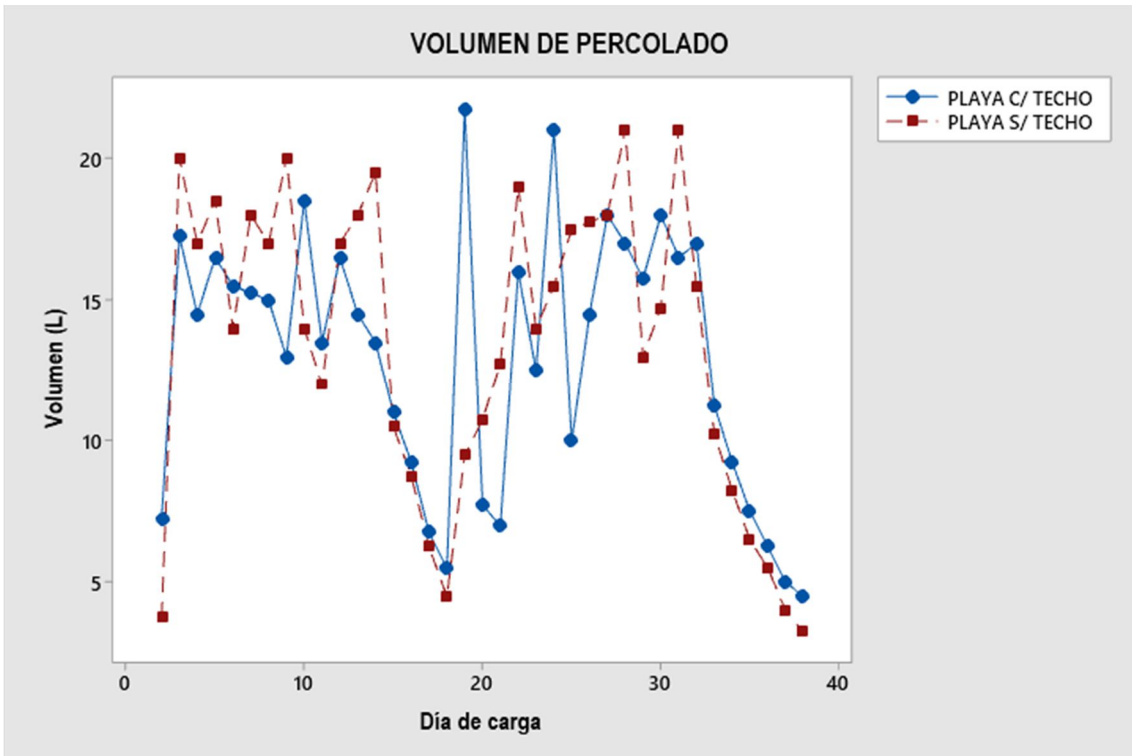


FIGURA 75: VOLUMEN DE PERCOLADO

En cuanto a los valores registrados de sólidos totales en el percolado el promedio se encuentra en 790 mg/l para la playa con techo y 740 para la playa sin cubierta.

10.2.1.5 Humedad en barros (M2)

Una vez finalizada la carga, pasados 32 días, se determinó la humedad de la torta de barro formada en la superficie de la playa. Se extrajo una muestra de barro, tres veces por semana. A continuación, en la **Figura 76** se muestran los resultados obtenidos.

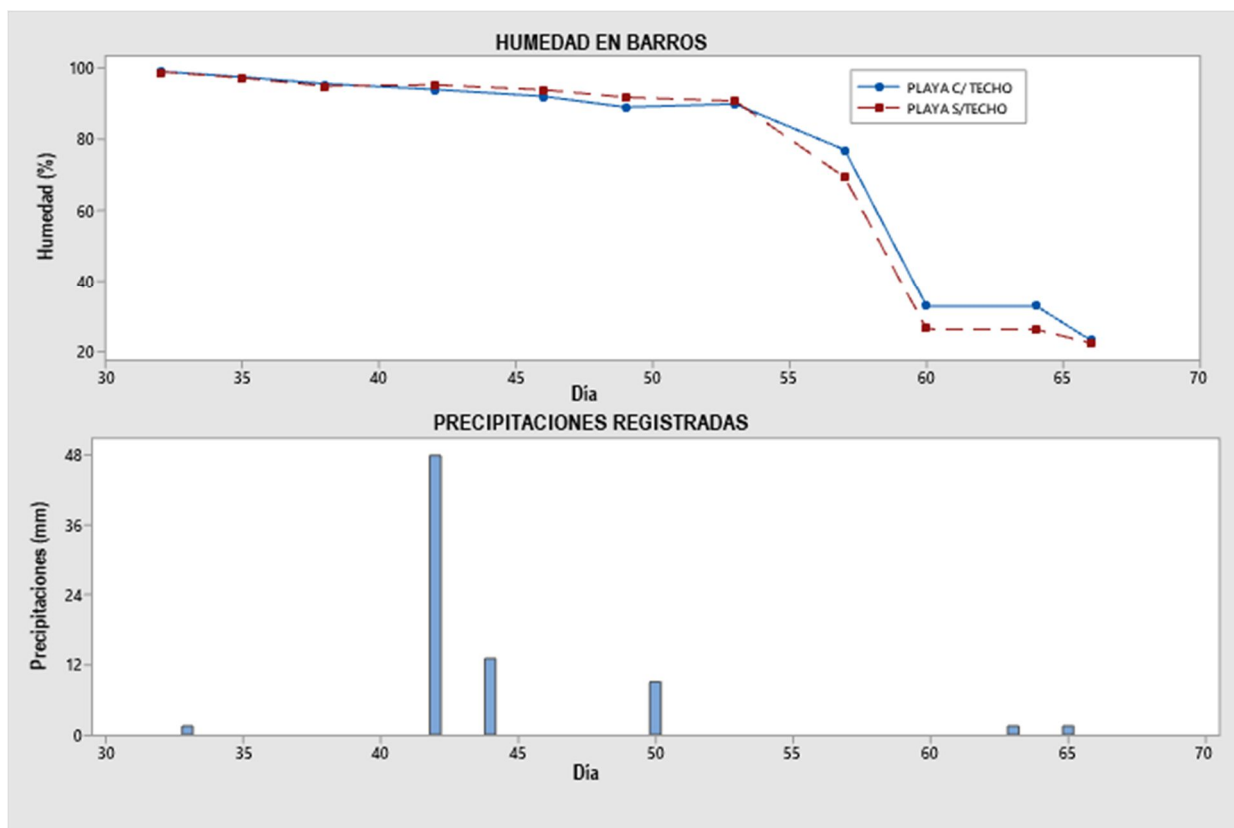


FIGURA 76: HUMEDAD EN BARROS-PRECIPITACIONES

Al analizar el contenido de humedad de los barros se observa que hasta el día 53 (21 días de secado), las humedades van en descenso y se solapan. Si bien se produjeron precipitaciones, no se aprecia un incremento de la humedad en la playa sin cubierta. Luego del día 53, la humedad de la playa sin techo disminuye respecto a la playa con techo. Al final de la etapa de secado (día 66), la humedad de ambas playas vuelve a solaparse. Se observa que la humedad inicial en la playa con techo es de 98.80% y de 98.70% para la playa sin techo. Luego de 32 días la playa con techo alcanza una humedad final de 22.97% mientras que la sin techo alcanzó una humedad final de 22.24%.

10.2.1.6 Altura en barros

Una vez finalizada la carga, y al comenzar la etapa de secado se midió la altura de la torta de barro de cada playa lo cual puede observarse en la **Figura 77**.

Al analizar esta gráfica, se observa que ambas playas presentan una torta de barro con similar altura hasta el día 48.

Este parámetro se pudo medir hasta el día 57, luego de ese período la torta de barro no era homogénea.

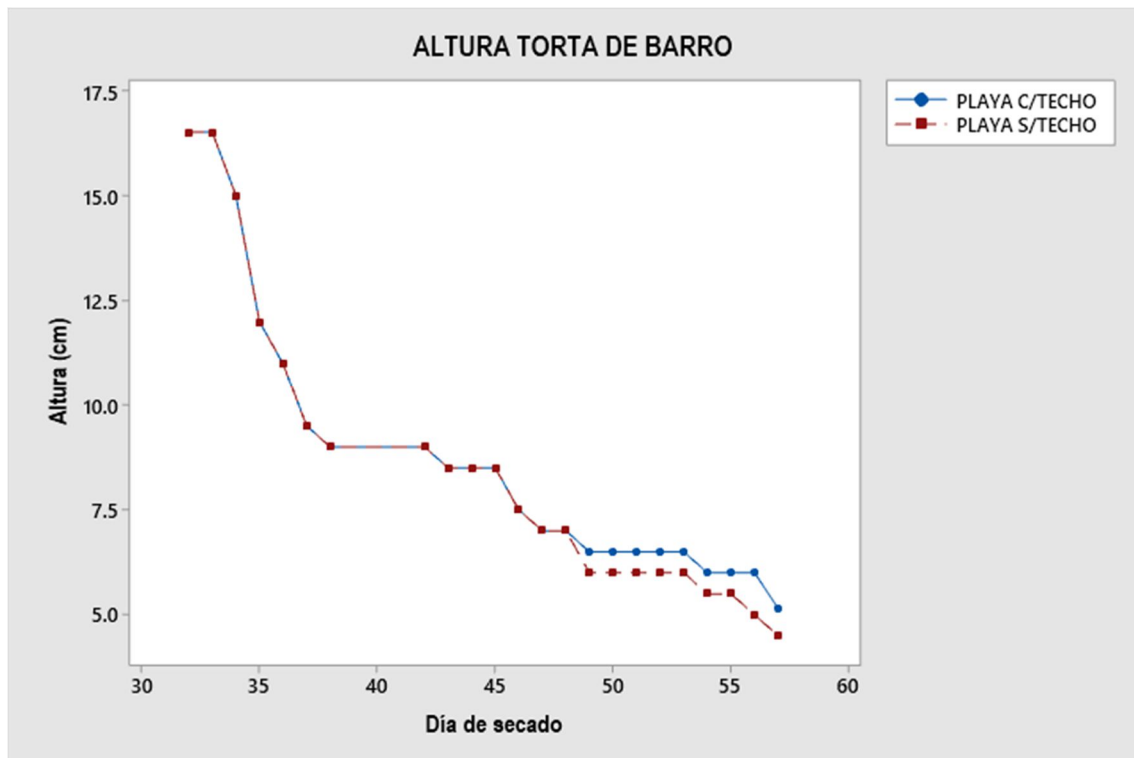


FIGURA 77: HUMEDAD EN BARROS-PRECIPITACIONES

10.3 Ensayo 2

Como se mencionó anteriormente, a fin de analizar si es beneficioso la colocación de una cubierta solar en las playas, se realizó un nuevo ensayo, pero ahora en época invernal durante los meses de **julio-agosto del año 2019**.

Cabe destacar que no se pudieron hacer las determinaciones con la misma frecuencia que para el Ensayo 1 debido a la pandemia y a la interrupción de las actividades académicas.

Previo al comienzo del ensayo, se limpió la superficie de las lajas y se reemplazaron los primeros 5 centímetros de arena en cada una de las playas. Solo se realizó una limpieza superficial pues se intentó reproducir lo que ocurre en la práctica previo al comienzo de la carga de barro.

La carga se realizó de manera diaria por un período de 27 días continuos. Pasado este tiempo, se interrumpió la alimentación iniciándose el proceso de secado, el cual se extendió por 31 días, por lo que la experiencia tuvo una duración total de 58 días.

La metodología de carga y muestreo de las plantas fue la misma que la empleada en el ensayo 1.

10.3.1 Registro de temperatura, volumen de percolado y precipitaciones

A partir de los termómetros instalados se registró la temperatura en el interior de las playas cada una hora. Se determinaron los valores máximos y mínimos a partir de los cuales se elaboraron las gráficas que se muestran a continuación. (Ver Figura 78, Figura 79, Figura 80)

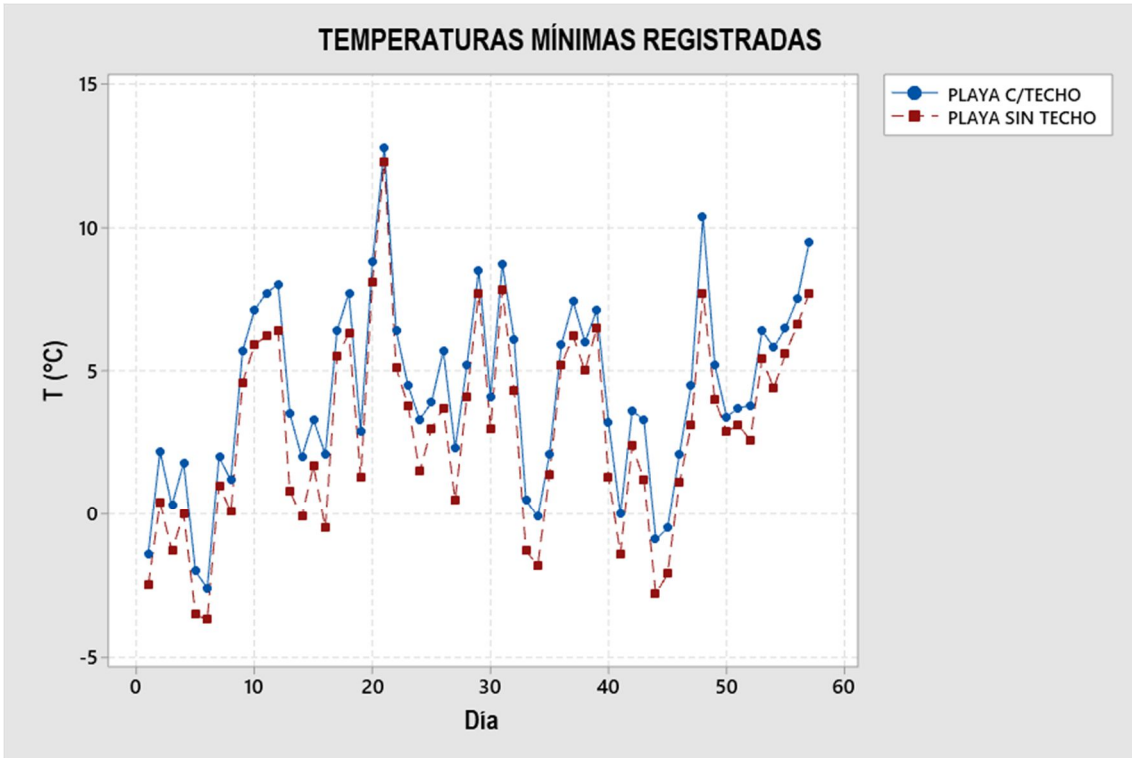


FIGURA 78: TEMPERATURAS MÍNIMAS REGISTRADAS DURANTE LA EXPERIENCIA EN AMBAS PLAYAS (2DO ENSAYO)

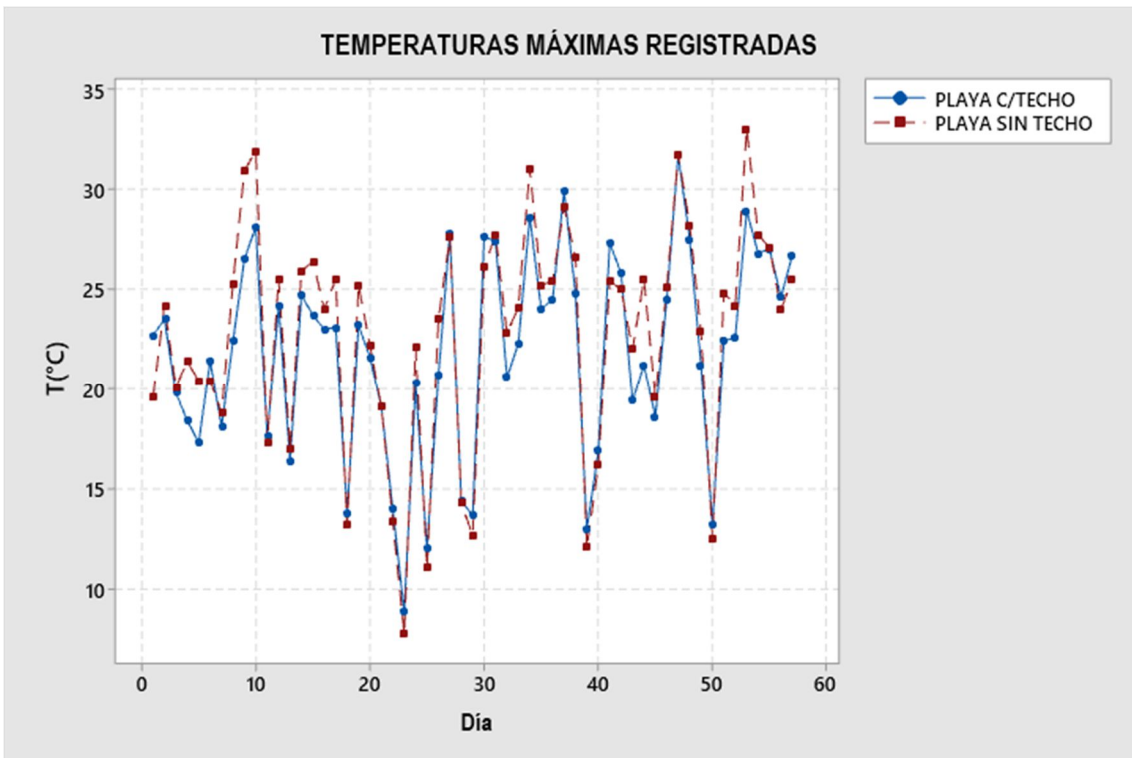


FIGURA 79: TEMPERATURAS MÁXIMAS REGISTRADAS DURANTE LA 2DA. EXPERIENCIA

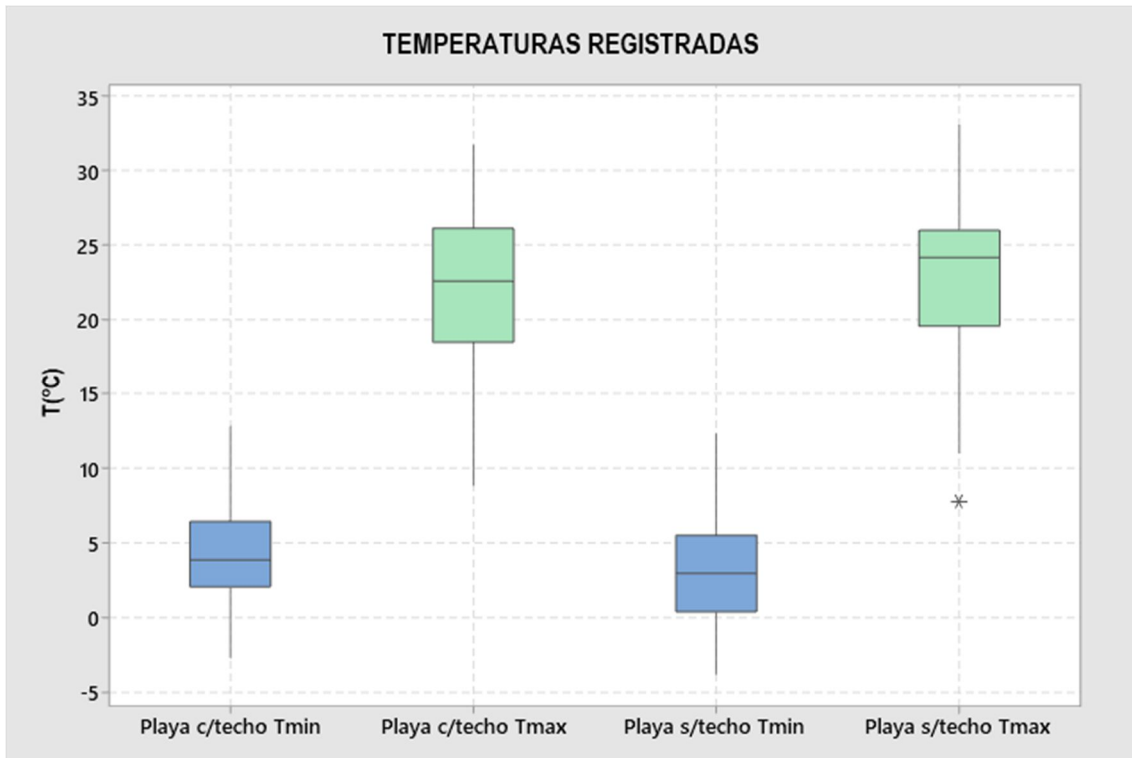


FIGURA 80: BOXPLOT CORRESPONDIENTE A TEMPERATURAS DIARIAS REGISTRADAS

Los rangos de temperatura registrados se encuentran entre el -2.6° y 31.7° C para la playa con cubierta solar y entre los -3.70° C y los 33.00° C para la playa sin techo.

Al analizar la gráfica de temperaturas mínimas se puede observar que si bien las temperaturas de la playa con techo se encuentran en todo momento por encima de la playa descubierta, la diferencia entre ambas es muy pequeña. Las temperaturas mínimas de la playa con techo son menos dispersos que los registrados en la playa sin cubierta.

Durante todo el ensayo, se midió el volumen de percolado de ambas playas como se muestra en la **Figura 81**.

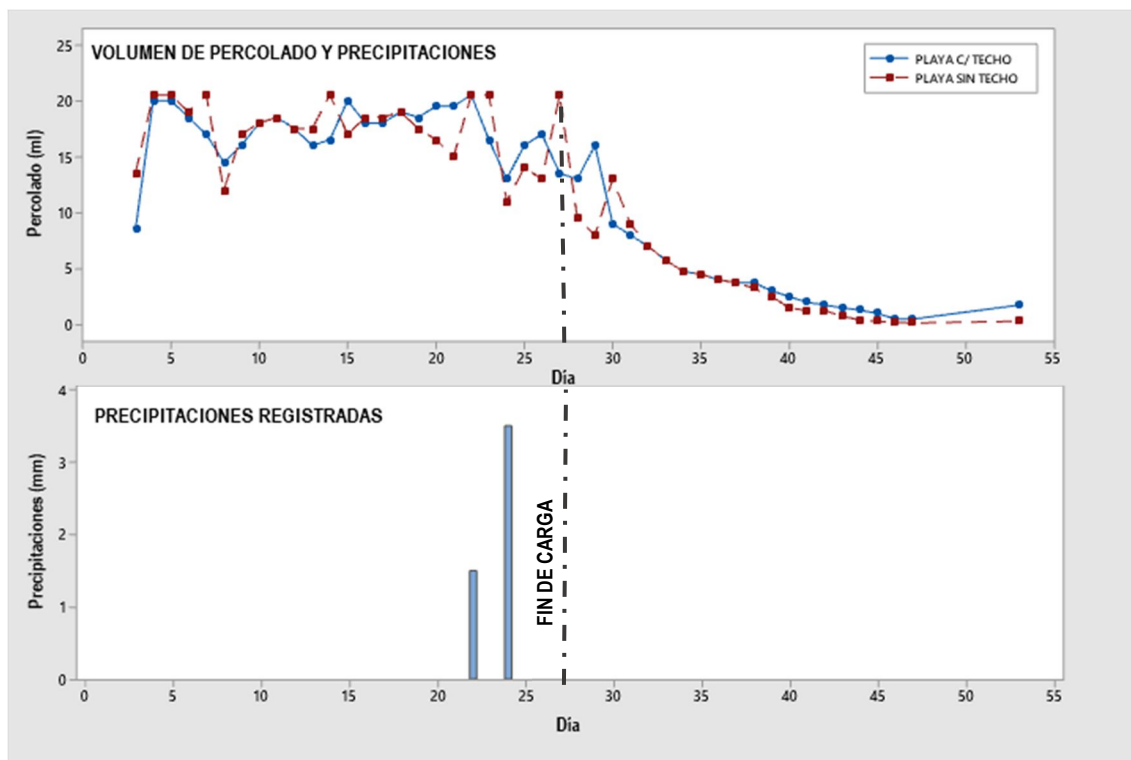


FIGURA 81: VOLUMEN DE PERCOLADO DE AMBAS PLAYAS Y PRECIPITACIONES. (ENSAYO 2)

En la gráfica se puede observar que el comportamiento de ambas playas es muy similar. Las precipitaciones no afectaron a la playa sin techo por que fueron pocas y de baja intensidad como era de esperar en época invernal.

El volumen promedio de percolado durante el proceso de carga es de 17.30 litros para la playa con techo y 17.13 litros para la playa sin cubierta

El volumen promedio de percolado durante el proceso de secado es de 4.12 litros para la playa con techo y 3.58 litros para la playa sin cubierta.

10.3.2 Determinación de As y turbiedades en percolado (M3)

Se determinó el contenido de As, Al y turbiedad en el percolado de cada una de las playas. Se realizaron dos análisis durante el período de carga (días 5 y 27) y uno en el período de secado (día 40). Estos resultados pueden observarse en la **Tabla 16**:

TABLA 16: AS, AL, Y TURBIEDAD EN PERCOLADO.

DÍA DE ENSAYO	PLAYA CON TECHO		PLAYA SIN TECHO	
	As (µg/L)	TURBIEDAD (UNT)	As (µg/L)	TURBIEDAD (UNT)
5	2.70	64.60	46.00	1.19
27	14.80	0.59	71.00	0.27
40	160.00	0.55	61.00	0.46

En lo que respecta a la concentración de As, se observa que en ambas playas los valores se van incrementando siendo más elevada la concentración en la playa sin techo en el período de carga. Durante el período de secado, esta situación se invierte.

10.3.3 Sólidos totales (M1 y M3)

Se evaluó el contenido de sólidos totales en dos puntos: en el barro que alimenta a las playas (M1) y en el percolado de las playas (M3). En la **Figura 82**, se muestran los resultados correspondientes a S.T. de los tanques de alimentación de las playas.

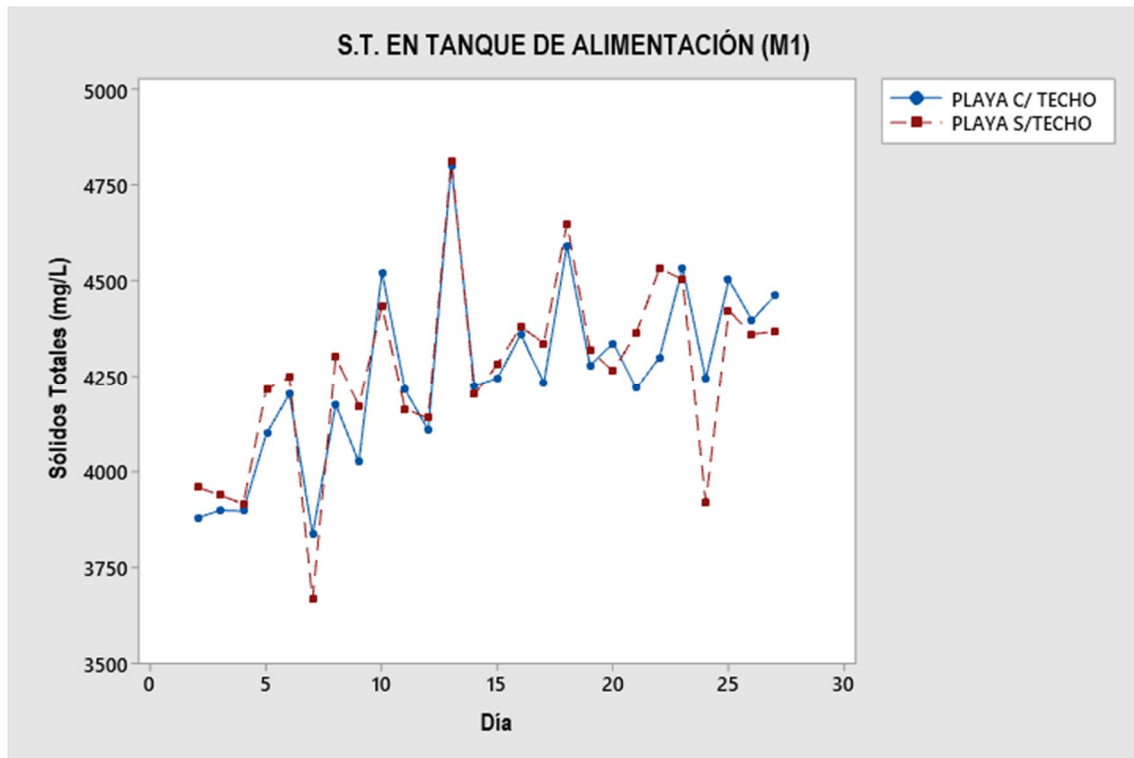


FIGURA 82: SÓLIDOS TOTALES EN TANQUE DE ALIMENTACIÓN (ENSAYO 2)

Se puede apreciar en la gráfica, que en general los valores de sólidos totales del barro de carga son similares, solapándose en algunos puntos. Se observa que los valores varían según el día de carga, siendo el valor mínimo registrado de 3837 mg/l para la playa con techo y de 3667 mg/l para la playa sin cubierta. El valor máximo registrado fue de 4799 mg/l para la playa con cubierta y 4814 mg/l para la playa sin techo. El promedio de sólidos totales se halla en 4253 mg/l para la playa con techo y 4264 mg/l para la playa sin cubierta.

A continuación, en la **Figura 83** se indican los sólidos totales medidos en el percolado de las playas.

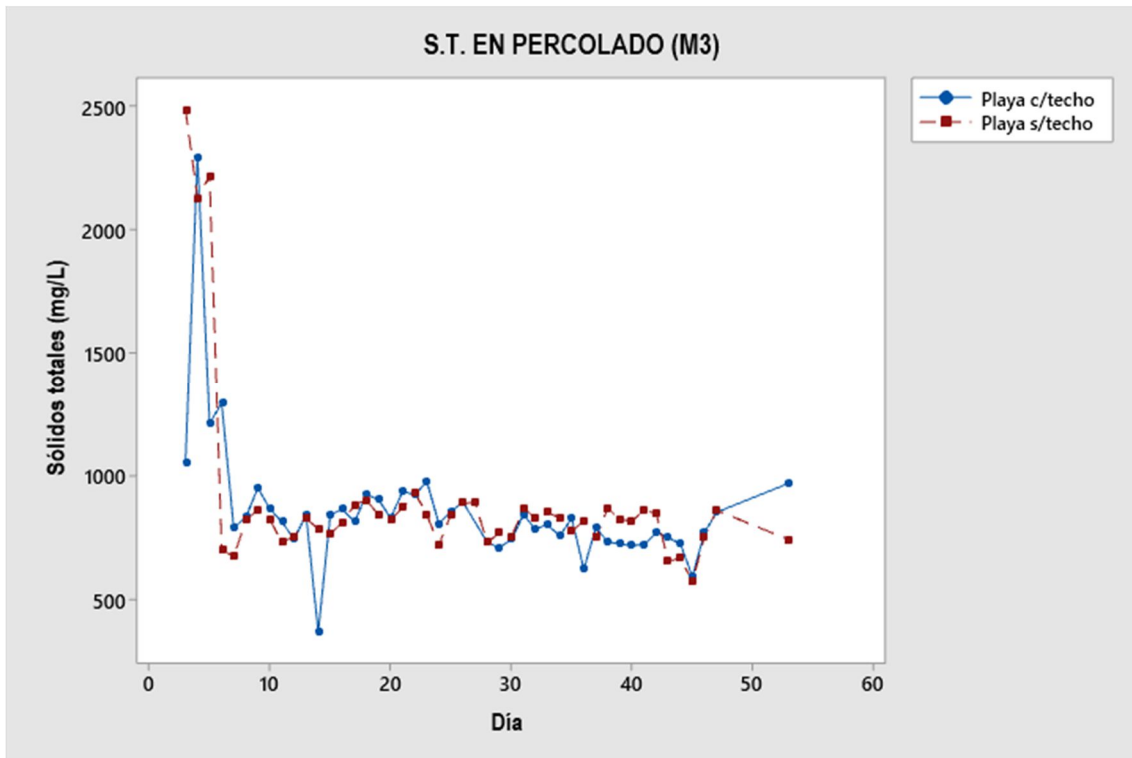


FIGURA 83: SÓLIDOS TOTALES EN PERCOLADO (ENSAYO 2)

En cuanto a los valores registrados de sólidos totales en el percolado, el promedio se encuentra entre 947 mg/l para la playa con techo y 899 para la playa sin cubierta, un poco mayores que los valores obtenidos en el Ensayo 1 (ver punto 10.2.1), lo que resultó lógico porque los valores en la alimentación fueron también más altos. Cabe destacar que el día 27 la playa con techo, presentó un valor de sólidos totales de 4884 mg/l, valor atípico que no fue incorporado en la gráfica.

10.3.3.1 Humedad en barros (M2)

Una vez finalizada la carga, a partir del día 9 de secado, se determinó la humedad de la torta de barro formada en la superficie de la playa. Se extrajo una muestra de barro, tres veces por semana. A continuación, en la Figura 84 se muestran los resultados obtenidos.

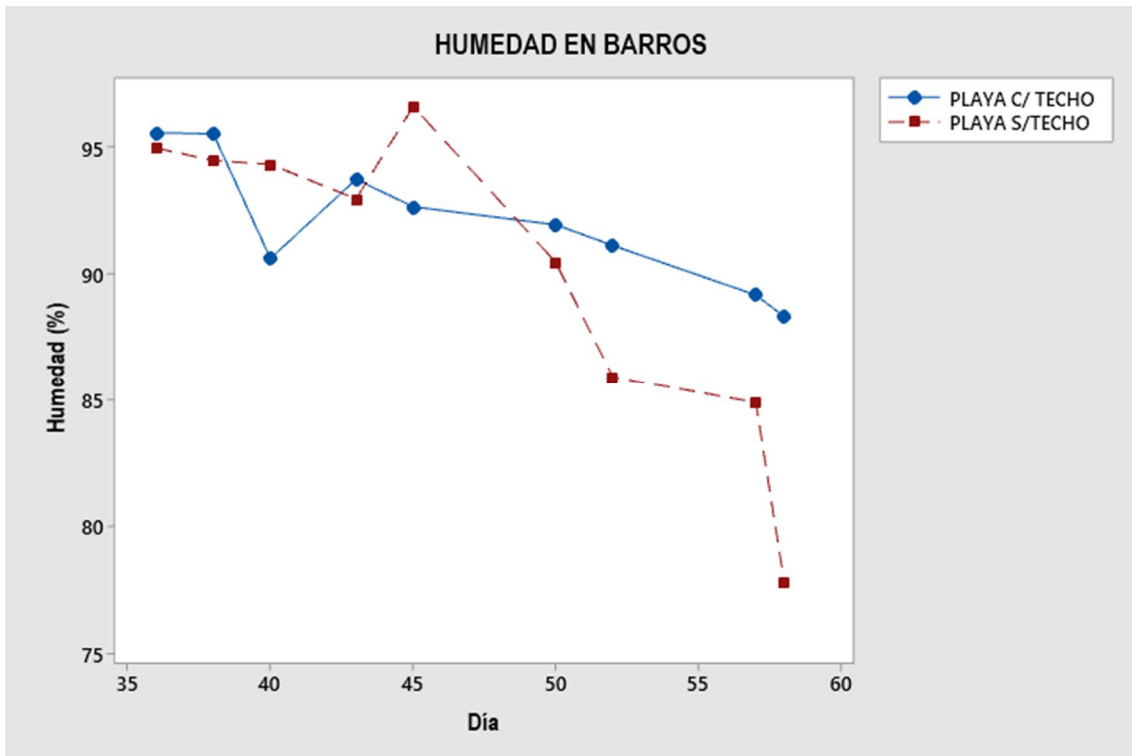


FIGURA 84: HUMEDAD EN BARROS (ENSAYO 2)

Al analizar el contenido de humedad de los barroes se observa que durante el período de secado (30 días) la playa con techo pierde sólo un 7.25 % de humedad (inicia el proceso de secado con una humedad del 95.57% y termina en 88.32%) mientras que la playa sin techo pierde un 17,17% del contenido inicial de humedad (comienza con 94.96% y lo finaliza en 77.79%). Durante el proceso de secado no se produjeron precipitaciones.

Los valores de humedad obtenidos indican que para las condiciones invernales la carga de sólidos aplicada en los ensayos es muy alta, esto coincide con lo que sucede en la planta de Lezama en las que el período necesario para el secado en los meses de verano es de aproximadamente 9 semanas y de 11 semanas en invierno (Crisanto *et al.*, 2012). Por otra parte, tomando los datos de precipitación y de evaporación promedio, la mencionada autora determinó que en invierno, en el mes de julio, se requieren 131 días para la deshidratación del barro.

10.3.3.2 Altura en barroes

Durante la etapa de secado se midió la altura de la torta de barro de cada playa lo cual puede observarse en la **Figura 85**.

Al analizar esta gráfica, puede apreciarse que ambas playas presentan una torta de barro con similar altura hasta el día 40. A partir de este día, la altura en la playa sin techo comienza a ser inferior a las alturas registradas en la playa con techo. Este hecho puede atribuirse a la condensación del vapor de agua dentro de la playa con techo.

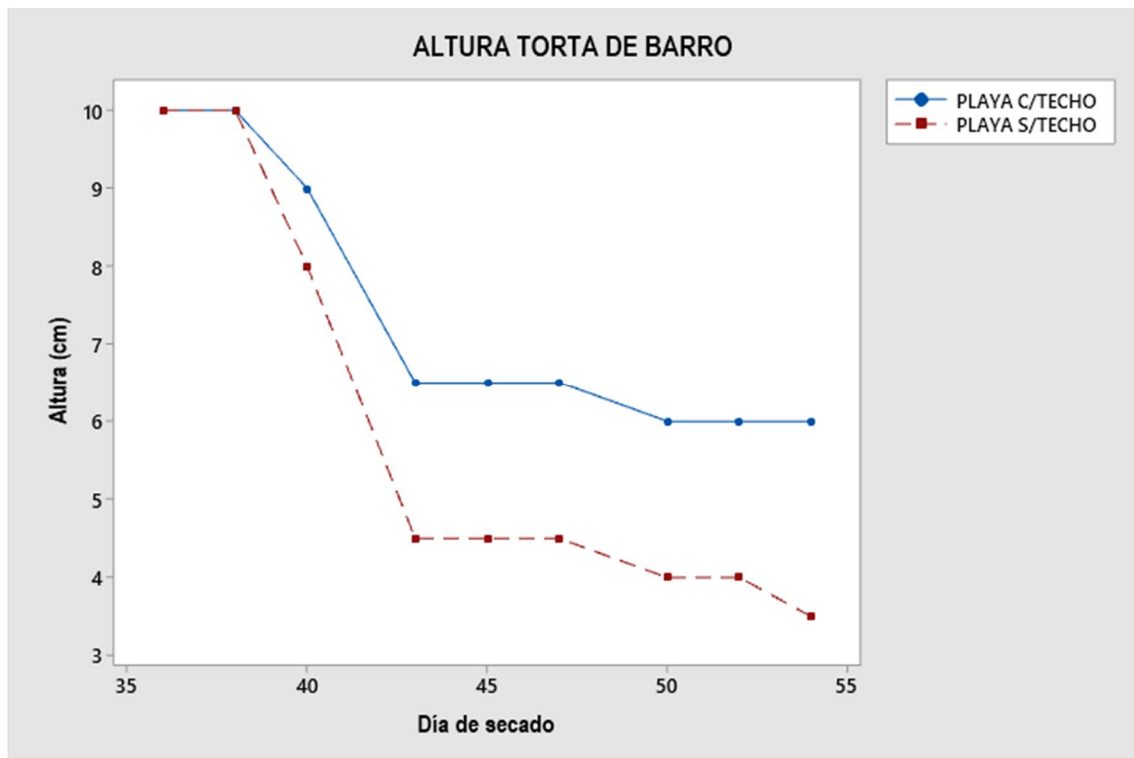


FIGURA 85: ALTURA DE LOS BARROS (ENSAYO 2)

10.3.3.3 Cálculo de la carga aplicada

Teniendo en cuenta una concentración promedio de sólidos totales 4500 mg/ y una carga diaria de 23 litros la carga de sólidos fue de 0.18kg/m²xdía y una carga anual de 65.3 kg/ m²xdía. Esta carga es el doble que la utilizada en los ensayos de laboratorio y evidentemente no resulta adecuada para los meses de invierno.

10.4 Conclusiones de las experiencias en campo

Luego de analizar los distintos ensayos, puede concluirse que la incorporación de una cubierta de policarbonato no produjo los resultados que se esperaban, probablemente debido a problemas de diseño.

Una posible causa, es el incorrecto diseño y ejecución de la cubierta que no permitió que la humedad generada en el interior de la playa sea liberada fuera de ella a partir de un ingreso continuo de aire seco.

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de las experiencias realizadas tanto en laboratorio como en campo, pudo estimarse que una carga adecuada a utilizar en el diseño de las playas sería de aproximadamente 30 Kg de sólidos por m² tal como se determinó en los ensayos de laboratorio.

Es necesario prestar atención a las concentraciones de As y Al en el percolado de las playas porque según se pudo observar pueden tener valores altos que hacen que su recirculación a la planta de tratamiento no resulte conveniente.

Se demostró en los ensayos que es necesario introducir una etapa de espesamiento antes del ingreso a las playas de secado ya que los barros provenientes de las piletas de recuperación de aguas de lavado son muy diluidos. Los espesadores deben diseñarse para lograr un aumento en la concentración de sólidos totales de 4500 mg/L.

Luego de analizar las distintas investigaciones que se han llevado a cabo respecto a sistemas de deshidratación de lodos (ver ítem 7.3.2), se vislumbra que las playas donde se han observado resultados favorables son aquellas en las que las aberturas para la circulación de aire suelen encontrarse tanto en la parte frontal como en los laterales de las cubiertas. En otros casos, se han incorporado ventiladores axiales en la parte superior de la cubierta a fin de favorecer las renovaciones de aire y así ayudar a la salida de aire húmedo.

Pese a no haber logrado mejorar la eficiencia en el secado de los lodos, a partir de la incorporación de la cubierta de policarbonato los resultados obtenidos a lo largo de las experiencias realizadas permiten extraer conclusiones valiosas sobre el funcionamiento de las playas para distintas situaciones climáticas.

Se considera de suma importancia, proteger las playas de las precipitaciones en época invernal, a fin de evitar un aumento en la humedad del barro y aprovechar el efecto invernadero diseñando una buena ventilación para evitar la condensación del aire húmedo.

Se recomienda profundizar en el análisis de la información existente en relación a las innovaciones que se han desarrollado en el diseño de las playas denominadas solares o los geotubos ya que pueden resultar alternativas interesantes.

BIBLIOGRAFÍA

- **Adams C. Ford, D. Eckenfelder W.** (1981) Development of Design and Operational Criteria for Wastewater Treatment. U.S.
- **AWWA** (1999) Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies. U.S.
- **Código Alimentario Argentino**, Capítulo XII
- **Cordeiro, Joao Sergio.** (2002) XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental: *Micro propiedades de lodos gerados em decantadores de estacoes de tratamento de agua*. Cancún México.
- **Crisanto, Tania.** (2012) Tesis de maestría, 2012
- **Felicio Dos Reis, Renán.** (2011) Universidad Federal de Sao Carlos: *Estudo de Influência de cobertura plástica na remoção de agua de lodos de estacoes de tratamento de agua em leitos de drenagem*. São Carlos. Brasil
- **Fontana, Antonio Osmar.** (2004) Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia-Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana-São Carlos: *Sistema de leito de drenagem e sedimentador como solução para redução de volume de decantadores e reuso de agua de lavagem de filtros- estudo de caso ETA de Cardoso*. São Carlos.
- **González A., Ingallinella A.M., Sanguinetti G., Quevedo H., Pacini V., Fernández R.** (2016). "Influence of silica in the arsenic removal from groundwater by coagulation, adsorption and filtration". En: *6th International Congress on Arsenic in the Environment Arsenic Research and Global Sustainability. International Society of Groundwater for Sustainable Development (ISGSD)*. Edición: CRC Press. Print ISBN 978-1-138-02941-5. eBook ISBN 978-1-315-62943-8, pp. 486-487.
- **Itle Courtney H.** (2001) Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University: *Properties of waste resulting from arsenic removal processes in drinking water treatment*. Blacksburg VA.
- **Labanca, Cintia B. Instituto Politécnico Superior "General San Martín".** (2020) *Trabajo Final Carrera Técnico Universitario en Química: Caracterización Barros generados en plantas de remoción de Arsénico*. Argentina.
- **Ley 11220**, Anexo A. Provincia de Santa Fe
- **Ley 24.051**, *Residuos Peligrosos-Generación, manipulación, transporte y tratamiento-Normas*. Argentina
- **Litter, Marta I., Sancha, Ana María, Ingallinella, Ana María.** (2010) *Iberoarsen: Tecnologías Económicas para el abatimiento de Arsénico en Aguas*. Argentina
- **NezihKamil Salihoglu, Vedar Pinarle, Gurat Salihoglu.** (2006). Faculty of Engineer and Architecture, Environmental Engineering Department Uludag: *Solar drying in sludge management in Turkey*. Bursa, Turkey.
- **PROSAB.** (1999) Rede cooperativa de pesquisas: *Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estacoes de Tratamento de Agua*. Rio de Janeiro.
- **Resolución 410/18: Manejo Sustentable de Barros y Biosólidos Generados en Plantas Depuradoras de Efluentes Líquidos Cloacales y Mixtos Cloacales-Industriales.** Argentina
- **RSA-CONICET: Arsénico en agua-informe final.** 2008, Argentina
- **Suárez, J. L., Burgos, A. J, Rodríguez, P. U.** (2015)- Universidad da Coruña-INDITEX: *Tecnologías de remoción de fangos*. España.
- **Suárez J. L., Burgos A. J, Rodríguez P. U.** (2013)- Universidad da Coruña-INDITEX: *Flotación por aire disuelto*. España.
- **U.S. EPA.** (1996) Technology Transfer Handbook: *Management of Water Treatment Plant Residuals*.
- **U.S. EPA.** (2002) *Arsenic Removal from Drinking Water by Coagulation/Filtration and Lime Softening Plants*. U.S.