



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**EVALUACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO DE LOS LECHOS DE
SECADO EN DIFERENTES PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO**

Autora
Lina Marcela Alzate Leal

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela ambiental
Medellín, Colombia

2021



**EVALUACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO DE LOS LECHOS DE SECADO EN
DIFERENTES PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL ORIENTE
ANTIOQUEÑO**

Lina Marcela Alzate Leal

Informe de práctica presentado como requisito parcial para
optar al título de:

Ingeniera Sanitaria

Asesores:

Ph.D. Msc. Ingeniera Sanitaria. Diana Catalina Rodríguez Loaiza

Ph.D. Msc. Ingeniero Sanitario. Francisco José Molina Pérez

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia

2021

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	10
1. OBJETIVOS	11
1.1 Objetivo General	11
1.2 Objetivos Específicos.....	11
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1 Antecedentes	11
2.2 Aspectos Generales de los Lodos.....	13
2.2.1 Características y composición de los Lodos	13
2.2.2 Producción de Lodos.....	14
2.2.3 Flujo de Lodos y Carga de Sólidos	16
2.3 Línea de Tratamiento de Lodos	16
2.4 Biosólidos.....	18
2.5 Base Normativa.....	18
2.6 Lechos de Secado	19
2.6.1 Mecanismos de Deshidratación en los Lechos.....	20
2.6.2 Factores que Afectan el Rendimiento.....	21
2.6.3 Detalles Constructivos.....	23
3. METODOLOGÍA.....	24
3.1 Metodologías de Dimensionamiento	24
3.2 Identificación y Diagnóstico Inicial.....	24
3.3 Recopilación de Información	26
3.4 Estimación de Áreas Requeridas	26
3.5 Comparación de Áreas Estimadas con las Áreas Construidas ...	30
3.6 Soluciones.....	30
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	31
4.1 Identificación y Diagnóstico inicial.....	31
4.2 Recopilación de Información	36
4.3 Estimación de Áreas Requeridas	40
4.4 Análisis de Áreas Estimadas con Áreas Construidas	50
4.5 Análisis de Art. 211 de Res. 0330 de 2017	58
4.6 Soluciones.....	60
5. CONCLUSIONES	61
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
7. Anexos	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características típicas de los lodos generados.....	14
Tabla 2. Características y cantidades de lodos en diversos sistemas ...	15
Tabla 3. Ventajas y desventajas de los lechos de secado	19
Tabla 4. Valores Típicos de Áreas Necesarias para Lechos de Secado	22
Tabla 5. Síntesis de información recolectada de las PTAR objeto de estudio.	40
Tabla 6. Estimación de área para la Piñuela usando el Art. 211 Res 0330/2017	40
Tabla 7. Estimación de área la Piñuela usando cargas superficiales	40
Tabla 8. Estimación de área para la Piñuela usando productividad	41
Tabla 9. Estimación de área La Piñuela usando Modelo de Cornwell & Vandermeijden	42
Tabla 10. Estimación de área para Granada usando Art. 211 Res 0330/2017	42
Tabla 11. Estimación de área para Granada usando cargas superficiales de lodo	42
Tabla 12. Estimación de área para Granada usando la productividad	43
Tabla 13. Estimación de área para Granada usando Modelo de Cornwell & Vandermeijden	44
Tabla 14. Estimación de área para San Francisco usando Art. 211 Res 0330/ 2017	44
Tabla 15. Estimación de área para San Francisco usando cargas superficiales de lodo	45
Tabla 16. Estimación de área para San Francisco usando productividad	45
Tabla 17. Estimación de área basada en Modelo de Cornwell & Vandermeijden	46
Tabla 18. Estimación de área para San Vicente usando Art. 211 Res 0330/ 2017	46
Tabla 19. Estimación de área para San Vicente usando cargas superficiales de lodo	47
Tabla 20. Estimación de área para San Vicente usando la metodología de productividad	47
Tabla 21. Estimación de área para San Vicente usando Modelo de Cornwell & Vandermeijden	48
Tabla 22. Estimación de área para Santo Domingo usando Art. 211 Res 0330/ 2017	48
Tabla 23. Estimación de área para Santo Domingo usando cargas superficiales de lodo	49

Tabla 24. Estimación de área para Santo Domingo usando la productividad	49
Tabla 25. Estimación de área para Santo Domingo usando el Modelo de Cornwell & Vandermeijden.....	50



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de las opciones de tratamiento de lodos	16
Figura 2. Sección transversal celda de lechos de secado	20
Figura 3. Representación esquemática del mecanismo de deshidratación de lodos en lechos de secado.	20
Figura 4. Detalle constructivo lecho de secado.	23
Figura 5. Localización de las PTAR objeto de estudio	25
Figura 6. Diagrama de flujo PTAR Piñuela	31
Figura 7. Material de canal desarenador dispuesto en lechos de secado La Piñuela	32
Figura 8. Diagrama de flujo PTAR Granada.....	33
Figura 9. Desnivel evidenciado en una de las celdas de secado de PTAR Granada	33
Figura 10. Diagrama de flujo PTAR "La Tripa 2"	34
Figura 11. Diagrama de flujo PTAR San Vicente Ferrer	35
Figura 12. Diagrama de flujo PTAR Santo Domingo.....	36
Figura 13. Dimensiones de lechos de secado construido Santo Domingo.....	37
Figura 15. Dimensiones de lechos de secado PTAR Granada	38
Figura 16. Dimensiones de lechos de secado construido PTAR San Vicente	39
Figura 17. Comparación de áreas estimadas con área construida en La Piñuela	51
Figura 18. Análisis estadístico de áreas de lechos de secado PTAR La Piñuela	52
Figura 19. Comparación de áreas estimadas con área construida Granada.....	52
Figura 20. Análisis estadístico de áreas de lechos de secado PTAR Granada.....	53
Figura 21. Comparación de áreas estimadas con área construida San Francisco	54
Figura 22. Análisis estadístico de áreas de lechos de secado PTAR San Francisco	55
Figura 23. Comparación de áreas estimadas con área construida San Vicente Ferrer.....	56
Figura 24. Análisis estadístico de áreas de lechos de secado PTAR San Vicente Ferrer.....	56
Figura 25. Comparación de áreas estimadas con área construida Santo Domingo	57

Figura 26. Análisis estadístico de áreas de lechos de secado PTAR Santo Domingo	58
Figura 27. Consolidado de áreas estimadas.	59
Figura 28. Mapa de Evaporación Promedio Anual	65
Figura 29. Localización de PTAR Granada	66
Figura 30. Localización de PTAR San Francisco	66
Figura 31. Localización de PTAR del municipio de Santo Domingo.....	67
Figura 32. Ubicación PTAR La Piñuela	67
Figura 33. Localización de PTAR del municipio de San Vicente Ferrer. 68	



SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

DBO	Demanda biológica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
FAFA	Filtro anaerobio de flujo ascendente
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
PRFV	Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio
RAS	Reglamento Técnico del agua Potable y Saneamiento Básico
SST	Sólidos Suspendidos totales
ST	Sólidos Totales
SV	Sólidos Volátiles
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
UTM	Universal Transverse Mercator
WEF	Federación Ambiental del Agua



EVALUACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO DE LOS LECHOS DE SECADO EN DIFERENTES PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

RESUMEN

Los lechos de secados son sistemas empleados para la deshidratación y secado de los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, sin embargo, a nivel de diseño generalmente se construyen con base en la disposición de terreno, sin tener en cuenta determinados parámetros para dar real solución al problema de deshidratación de lodos.

En el informe de práctica se evaluó el dimensionamiento de los lechos de secado, con el fin de definir si es necesario su rediseño en las PTAR del área urbana de los municipios de San Francisco, Santo Domingo, San Vicente, Granada y el corregimiento de la Piñuela, en el departamento de Antioquia. Las estimaciones de áreas se realizaron empleando las siguientes metodologías: dimensionamiento definido en la Res 0330 de 2017 (RAS 2017), cargas superficiales de lodo, productividad y el modelo de Cornwell & Vandermeijden. Luego de realizar un análisis estadístico a las áreas estimadas y compararlas con las áreas de lechos de secado construidas, se encontró que cuatro de los cinco lechos de secado evaluados estaban subdimensionados. Además, las áreas de lechos de secado calculadas mediante las indicaciones de la Res. 0330 de 2017 dan como resultado un sobredimensionamiento apreciable respecto a los resultados obtenidos por los otros métodos.

1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales implica la generación continua y progresiva de diferentes subproductos que han de manejarse adecuadamente para evitar poner en riesgo la salud pública y el medio ambiente. Uno de los subproductos que con frecuencia representa importantes desafíos técnicos, significativos costos de operación y grandes requerimientos de terreno en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), son los lodos. Campbell (2000) afirma que la gestión de los lodos ha evolucionado, pasando desde un enfoque que podría describirse como una “idea tardía” a ser una cuestión que merece bastante atención. En la actualidad se estima que la gestión de los lodos puede requerir aproximadamente un 30% del área total y hasta un 60% del valor total de los costos de operación de las PTAR, dependiendo del sistema empleado (Andreoli et al., 2007). Un estudio realizado en el año 2003 calculó que los lodos producidos diariamente en las PTAR de las principales ciudades de Colombia fue de al menos 274 toneladas (Dáguer, 2003).

El manejo de los lodos comúnmente se realiza a través de varias etapas, como lo son el espesamiento, la estabilización, el acondicionamiento, la deshidratación y la disposición final. Los lechos de secado son ampliamente utilizados para la deshidratación de lodos en pequeñas y medianas PTAR, especialmente en Latinoamérica dado que las condiciones climáticas son muy favorables para la aplicación de este método (Orozco, 2005; Ramalho et al., 1996), constituyen una de las tecnologías de tratamiento de lodos más económicas para la deshidratación. En muchos casos los lechos de secado se construyen con base en la disposición de terreno, sin tener en cuenta determinados parámetros para dar real solución al problema de deshidratación de lodos, lo cual desencadena en una serie de problemas como pueden ser sobrecostos en la disposición final de lodos, riesgos para la salud pública y elevados impactos ambientales.

En vista de la problemática mencionada, en el presente informe de práctica se evaluó el dimensionamiento de los lechos de secado, con el fin de definir si es necesario su rediseño en las PTAR del área urbana de los municipios de San Francisco, Santo Domingo, San Vicente, Granada y el corregimiento de la Piñuela, en el departamento de Antioquia. Para alcanzar los objetivos planteados, se abordó dicha problemática mediante una serie de fases tales como la identificación general de las unidades que conforman las PTAR, la

estimación de cantidades de lodos producidas en cada PTAR, la evaluación del estado inicial de los lechos de secado y de las condiciones operativas y finalmente, luego de determinar las problemáticas existentes, se realizó el dimensionamiento de los lechos de secado por los cuatro métodos mencionados previamente, con el fin de proponer la mejora de las condiciones operativas de los lechos de secado.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar el dimensionamiento de los lechos de secado de las PTAR del área urbana de los municipios San Francisco, Santo Domingo, San Vicente, Granada y el corregimiento de la Piñuela, en el departamento de Antioquia.

2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Realizar un diagnóstico del estado inicial de las condiciones operativas y de diseño de los lechos de secado en las plantas de tratamiento de aguas residuales en estudio.
- ✓ Proponer soluciones que permitan el mejoramiento de las unidades existentes y la implementación de nuevos procesos acordes con el uso final de los biosólidos.
- ✓ Comparar las dimensiones los lechos de secado construidas con las dimensiones estimadas por diferentes metodologías.

3. MARCO TEÓRICO

El tratamiento de las aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos encaminados a disminuir la carga contaminante de dichas aguas y producir aguas residuales tratadas, ambientalmente seguras; sin embargo, en estos procesos se generan lodos que por sus características requieren ser espesados, estabilizados y deshidratados antes de su disposición o uso final (Alvarez et al., 2016; Pidre et al., 2007).

3.1 Antecedentes

En el pasado era común encontrar esquemas de PTAR que mostraban el sistema de tratamiento de líquidos en detalle, con todos los procesos

unitarios apropiados y una flecha al final que señalaba "lodo a disposición", la suposición de que el lodo desaparecería de alguna manera fue respaldada por el hecho de que solo una pequeña fracción del presupuesto correspondía a la gestión de lodos. No obstante, este enfoque no representa la realidad, pues hoy en día la gestión de los lodos es uno de los aspectos que representa importantes desafíos técnicos y una gran parte de los costos de inversión y operativos (Campbell, 2000). De hecho, hoy en día existe una gran preocupación por parte de los ingenieros colombianos respecto al manejo de lodos y el dimensionamiento de los lechos de secado, dado que los métodos de diseño siguen siendo muy empíricos, y en particular para Colombia no hay normatividad clara que indique parámetros de diseño ciertos respecto a los lechos de secado, que son el método de deshidratación empleado típicamente en Colombia.

Antes de ahondar en el análisis es primordial examinar la legislación colombiana, algunas investigaciones y textos que se han elaborado respecto al tema de gestión de lodos. A continuación, se mencionan los que servirán de sustento al presente informe de práctica:

En el Artículo 211 de la Res. 0330 de 2017 se indican los requerimientos de área para los lechos de secado a cielo abierto, estos varían acorde al tipo de lodo que será descargado sobre los lechos, de modo que el requerimiento de área es de 0.1 m² per cápita para lodos primarios digeridos, 0.12 a 0.16 m² per cápita para lodos procedentes de filtros percoladores y 0.16 a 0.24 m² per cápita para lodos activados digeridos, sin embargo, los valores anteriores pueden reducirse al 75% cuando los lechos de secado son cubiertos. Es importante resaltar que, a la fecha, estas son las únicas indicaciones existentes en la legislación colombiana para el dimensionamiento de los lechos de secado.

En el trabajo realizado por Cornwell & Vandermeijden (1999) "*Sizing residuals drying beds*", se desarrollaron criterios de diseño para la deshidratación no mecánica de lodos, se muestra que los ensayos piloto pueden permitir un pronóstico acertado del rendimiento a gran escala y por lo tanto, el desarrollo de parámetros de diseño útiles. También, se propone un modelo basado en datos climatológicos locales y producción de lodos, para el dimensionamiento y diseño de sistemas de deshidratación no mecánicos como lechos de secado de arena, lechos de secado solar y lagunas de deshidratación, el cual se puede implementar en el presente trabajo.

En el informe "*Sludge handling and disposal in tropical developing countries*", Pescod (1971) expone los resultados de experimentos realizados con lechos de secado de arena en Bangkok, Tailandia. Acorde a los resultados de su experimento, determina que los lodos con un contenido de sólidos del 25% pueden ser extraídos, asimismo logra establecer para capas de lodo de 20 a 26 cm, tasas de carga que variaron entre 137 y 475 kg/ m² *d en la estación seca y periodos de secado que oscilaron entre 5 y 15 días, dependiendo de las tasas de carga aplicadas que variaron entre 70 - 475 kg/m² * año. Los resultados mostrados por Pescod se relacionan con el presente informe de práctica, en vista de que se puede tomar como referencia el rango de tasas de carga, dado que dicha investigación fue llevada cabo en un país con clima tropical.

3.2 Aspectos Generales de los Lodos

El término "lodo" se ha utilizado para designar los subproductos sólidos que surgen del tratamiento de las aguas residuales y suelen estar formados por una mezcla compleja de compuestos orgánicos no digeridos, biomasa y algunas especies inorgánicas (Alvarez et al., 2016; Amuda & Hung, 2008). A partir de las etapas de tratamiento primario y tratamiento secundario, suelen generarse grandes cantidades de lodos, que han de tratarse y disponerse adecuadamente para evitar poner en riesgo el rendimiento adecuado de las PTAR, la salud pública y el medio ambiente. La cantidad y características de los lodos dependen de la población atendida, el carácter de las aguas residuales crudas y los procesos de tratamiento aplicados, cuanto mayor sea el grado de tratamiento, mayor será la cantidad de lodos generados (Foladori et al., 2013; Lin, 2014).

3.2.1 Características y composición de los Lodos

Los lodos son un medio heterogéneo que se compone principalmente de una fracción de agua mayor al 90% y una fracción de sólidos que suele ser inferior al 10%. De acuerdo con la etapa de tratamiento empleada, los lodos pueden ser primarios o secundarios. Los lodos primarios consisten en partículas sólidas, fundamentalmente de naturaleza orgánica que contienen aproximadamente del 3% a 7% de sólidos, de los cuales aproximadamente del 60% al 80% son orgánicos. Por otro lado, los lodos secundarios son fundamentalmente conglomerados de bacterias producto del tratamiento biológico aplicado a dichas aguas, de manera que son formados principalmente por biomasa bacteriana que suele oscilar en rangos entre 75

a 90% y pequeñas fracciones de materiales inertes (Brisolara et al., 2020; Lin, 2014).

Tabla 1. Características típicas de los lodos generadas en cada etapa

Etapa de Tratamiento	Unidad	Primario	Secundario	Terciario
Cantidad de lodos generadas, por m ³ de agua residual	L/m ³	2,5 - 3,5	15 - 20	25 - 30
Contenido de sólidos	%	3 - 7	0,5 - 2	0,2 - 1,5
Contenido orgánico	%	60 - 80	50 - 60	35 - 50
Sólidos de la torta	%	28 - 44	20 - 35	---

Adaptado de Lin et al., (2014)

3.2.2 Producción de Lodos

Para planear adecuadamente la gestión de lodos es fundamental tener en cuenta las cantidades que han de generarse, pues este es un dato fundamental para el diseño y dimensionamiento de las instalaciones de manejo de lodos y establecimiento de los requerimientos de superficie. La producción de lodos está estrechamente ligada al sistema de tratamiento empleado en las aguas residuales. Según Amuda et al. (2008) en los clarificadores primarios, se puede estimar el volumen de lodos húmedos como se muestra en la ecuación (2):

$$M_s = \gamma \times S \times Q \quad (1)$$

Dónde	
M_s	= masa de sólidos primarios, kg/s
γ	= eficiencia del clarificador primario
S	= SST en afluente del clarificador primario, kg/m ³
Q	= caudal, m ³ /s

$$V = (M/S)/1000 \quad (2)$$

Dónde	
V	= volumen del lodo húmedo producido, m ³ /s
M	= masa de sólidos secos, kg / s
S	= contenido de sólidos, %
1000	= densidad del agua, kg / m ³

En la etapa de tratamiento biológico se genera el llamado "lodo biológico", que consiste en biomasa que crece a expensas del alimento presente en el agua residual. Sperling et al. (2007) sostienen que, si no se purga el exceso de lodo, tiende a acumularse en el sistema y acaba saliendo en el efluente final, deteriorando la calidad de éste en términos de sólidos en suspensión y materia orgánica. Pese a que la producción de los lodos biológicos se puede calcular teniendo presente los coeficientes cinéticos y estequiométricos del proceso, para efectos prácticos se emplea la Tabla 2, que sirve para realizar estimaciones de masa de sólidos en suspensión generada por unidad de DQO aplicada, considerando las eficiencias típicas de remoción de DQO de varios procesos de tratamiento de las aguas residuales.

Tabla 2. Características y cantidades de lodos en diversos sistemas

Sistema de tratamiento	Kg SS/ kg DQO aplicado	Contenido de sólidos secos (%)	Masa de lodos (g SS/hab*d)	Volumen de lodos (L/hab*d)
Tratamiento Primario (Convencional)	0.35–0.45	2–6	35–45	0,6-2,2
Tratamiento Primario (Tanque séptico)	0.20–0.30	3–6	20–30	0,3-1,0
Laguna facultativa	0.12–0.32	5–15	12-32	0,1-0,25
Laguna anaerobia – facultativa	0.26–0.55	-	26-55	0,15-0,45
Laguna facultativa aireada	0.08–0.13	6–10	8–13	0,08-0,22
Tanque séptico +Filtro anaerobio	0.27–0.39	1.4–5.4	27–39	0,5-2,8
Lodos activados convencionales	0.60–0.80	1–2	60–80	3,1-8,2
Lodos activados Aireación extendida	0.50–0.55	0.8–1.2	40–45	3.3-5.6
Filtro percolador de alta tasa	0.55–0.75	1.5–4.0	55–75	1,4-5,2
Reactor UASB	0.12–0.18	3–6	12–18	0,2-0,6
Reactor UASB + Tto aerobio	0.20–0.32	3–4	20–32	0,5-1,1

Tomado de Sperling et al., (2005)

3.2.3 Flujo de Lodos y Carga de Sólidos

El diseño de las etapas de tratamiento de lodos suele basarse en el flujo de lodos o en la carga de sólidos secos. Ambos se relacionan con la concentración de sólidos, tal como se muestra en las ecuaciones (4) y (5).

$$Carga = Caudal \times Concentración \quad (3)$$

$$Flujo \text{ de lodo (m}^3/d) = \frac{Carga \text{ de SS (kg SS/d)}}{\frac{Sólidos \text{ secos (\%)}{100} \times Densidad \text{ del lodo (kg/m}^3)} \quad (4)$$

$$Carga \text{ de Sólidos (kg SS/d)} = \frac{Caudal \text{ (m}^3/d) \times Concentración \text{ (g/m}^3)}{1000 \text{ (g/kg)}} \quad (5)$$

3.3 Línea de Tratamiento de Lodos

Sin importar el destino final de los lodos, estos deben ser previamente tratados. Mackenzie (2019) afirma que existe una variedad de procesos encaminados a brindar un manejo adecuado a los lodos, de manera que la incorporación de cada uno de estos procesos es función directa de la naturaleza y características del lodo, el destino final de los lodos, así como del tipo, tamaño y localización de la PTAR. En la Figura 1 se presenta un diagrama de flujo con los procesos básicos para el tratamiento de lodos y diferentes alternativas de estos. Estos procesos consisten en espesamiento, estabilización, acondicionamiento, deshidratación y uso o disposición final.

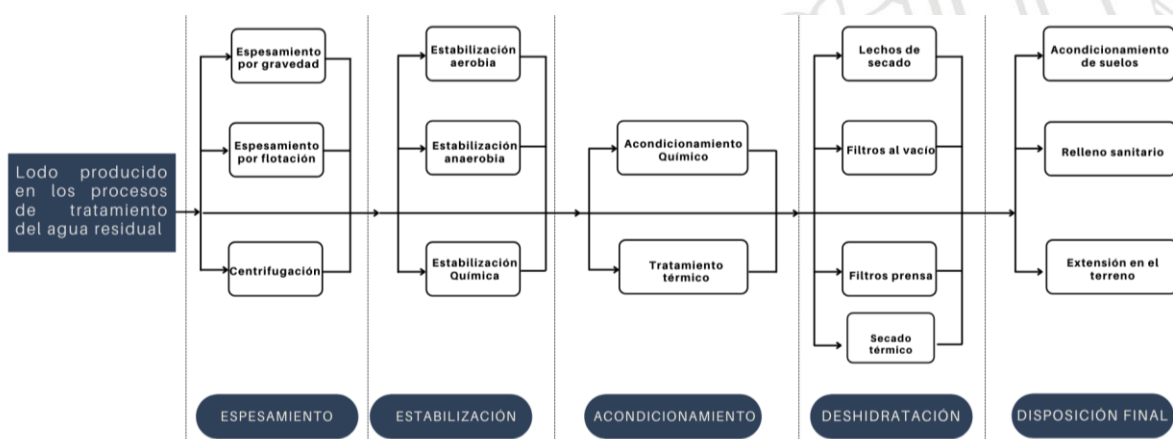


Figura 1. Diagrama de flujo de las opciones de tratamiento de lodos
Adaptado de Villaseñor Gándara (1995)

A pesar de que existen diversos procesos para el tratamiento de lodos, es importante mencionar que el método más frecuentemente usado para la

gestión de los lodos es la digestión aeróbica o anaeróbica seguido de la deshidratación. Si bien el análisis del presente documento solo está encaminado al proceso de deshidratación, es importante definir en que consiste cada proceso:

Espesamiento: Esta es usualmente la primera etapa en la línea de lodos una vez se ha generado el lodo crudo en la PTAR. El espesamiento es un proceso físico que ayuda a realizar cualquier tratamiento posterior dado que incrementa la concentración de lodos (McFarland, 2001). Los métodos de espesamiento más comunes suelen ser por gravedad, centrifugación y flotación, siendo la flotación el método más apropiado para espesar los lodos biológicos.

Estabilización: Posterior al espesamiento, sobre los lodos provenientes de aireación extendida, reactores UASB, lagunas anaerobias, entre otros, se pueden aplicar directamente las operaciones de acondicionamiento y deshidratación; o también se puede estabilizar luego del espesamiento, como es el caso de los lodos procedente de lodos activados convencionales o de alta tasa. La estabilización tiene como propósito reducir los patógenos, eliminar los materiales que causan olores e inhibir, reducir o eliminar el potencial de putrefacción para que el lodo pueda manipularse o usarse como acondicionador de suelos sin causar molestias o peligros para la salud (Lin, 2014). Los procesos de tratamiento comúnmente utilizados para la estabilización de lodos de las aguas residuales incluyen digestión aerobia, digestión anaerobia, estabilización química (cal, desinfectantes) y compostaje. Con frecuencia, se considera que un lodo está estabilizado cuando se obtiene una reducción del 38% de los sólidos volátiles durante el tratamiento, incluyendo cualquier tratamiento posterior (Pidre et al., 2007).

Acondicionamiento: Los lodos espesados mecánicamente y los lodos estabilizados biológica y químicamente en ocasiones requieren ser acondicionados. Dicho acondicionamiento consiste en la adición de productos químicos inorgánicos, polímeros orgánicos o calor, con la finalidad de mejorar la deshidratación de los lodos facilitando la eliminación del agua (McFarland, 2001).

Deshidratación: La deshidratación consiste en procesos físicos que por lo general se realizan luego de la estabilización y/o acondicionamiento de los lodos. Este proceso tiene como objetivo incrementar la concentración de sólidos, con la consecuente reducción de volumen de los lodos a disponer,

es decir, mediante este proceso se elimina suficiente agua de los lodos para generar un lodo que ya no es fluido y que ha de manipularse y transportarse como un sólido(He et al., 2021; Lin, 2014). Si bien existen numerosas técnicas de deshidratación que emplean procesos mecánicos o naturales y que cumplen con la definición funcional básica de deshidratación, lo hacen en grados muy diferentes, es por ello importante identificar las necesidades específicas de cada PTAR y las características de los lodos que se producen (Wang et al., 2007).

Las técnicas de deshidratación mecánica incluyen filtración al vacío, filtración a presión, o centrifugación (Lin, 2014). La deshidratación natural es uno de los procesos más antiguos utilizados para tratar los lodos, las técnicas disponibles incluyen lagunas de lodos, lechos de secado de arena, pavimentados, de medio artificial y asistidos por vacío, y deshidratación mediante congelación(Alice Outwater, 1994; Chen & Mujumdar, 2002).

3.4 Biosólidos

El término “biosólido” fue elegido por la Water Environment Federation (WEF) a principios de la década de los 90 con la finalidad de proyectar una imagen para los “lodos procesados”, identificando que es un material con componentes valiosos que deben ser considerado un recurso en vez de un residuo, dado que son un material rico en nutrientes como fósforo y nitrógeno, y valiosos micronutrientes que pueden ser reciclados como enmiendas orgánicas y mejoradores de suelos (Campbell, 2000; McFarland, 2001).

3.5 Base Normativa

El Decreto 1287 de 2014, corresponde a la norma colombiana que establece los criterios fisicoquímicos y microbiológicos que permiten el uso de los biosólidos generados en las PTAR; esta norma precisa que los biosólidos son el producto resultante de la estabilización de la fracción orgánica de los lodos generados en el tratamiento de las aguas residuales municipales. Tiene como propósito que dichos biosólidos puedan ser usados adecuadamente en aplicaciones de tipo ambiental y agrícola, dado que en el país una gran parte de los biosólidos son enviados a los rellenos sanitarios, disminuyendo prematuramente su vida útil (MADS, 2014).

3.6 Lechos de Secado

Los lechos de secado son una de las tecnologías para deshidratación de lodos, más comúnmente usada en pequeñas PTAR donde hay disponibilidad de tierra y el clima local es favorable (He et al., 2021). En los casos donde las comunidades tengan poblaciones mayores a 20.000 habitantes deben considerarse otras alternativas de deshidratación de lodos. Son una tecnología aplicable a lodos previamente estabilizados o con alto grado de mineralización, pueden conseguir ahorros significativos en costos energéticos y operativos, además de producir una torta con mayor cantidad de sólidos que los sistemas de deshidratación mecánicos (Metcalf & Eddy, 2007). Si están bien diseñados y se operan correctamente, suelen ser menos sensibles a altas concentraciones de sólidos en los lixiviados y pueden producir un producto más seco que la mayoría de los dispositivos mecánicos (WEF, 2018), tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de los lechos de secado

Ventajas	Desventajas
Bajo costo de inversión, siempre y cuando no se requieran revestimientos elaborados y haya disponibilidad de terreno	Tecnología aplicable a lodos previamente estabilizados o con alto grado de mineralización
El seguimiento y nivel de preparación por parte de los operarios no es muy alto	Gran requerimiento de terreno
Ahorros significativos en costos energéticos y operativos	Falta de un enfoque de diseño racional para un análisis económico sólido
Menos sensible a la variabilidad de las características de lodos	El clima impacta significativamente el diseño y el desempeño
Alcanza mayores concentraciones de sólidos que los métodos mecánicos	La eliminación de lodos demanda mucha mano de obra
Bajo o nulo consumo de productos químicos	Olor real o percibido y molestias visuales.

Adaptado parcialmente de WEF,(2018)

Si bien existen cuatro tipos de los lechos de secado: convencionales de arena, pavimentados, de medio artificial y asistidos por vacío, este trabajo centrará su atención en los lechos de secado de arena en vista que son el método de deshidratación de lodos aplicado en pequeñas PTAR. Tal como se ilustra en la Figura 2, en los lechos de secado se utilizan medios porosos como capa de soporte para retener los sólidos que son separados del

exceso de lodo, mientras el agua es removida de los lodos por evaporación y percolación.

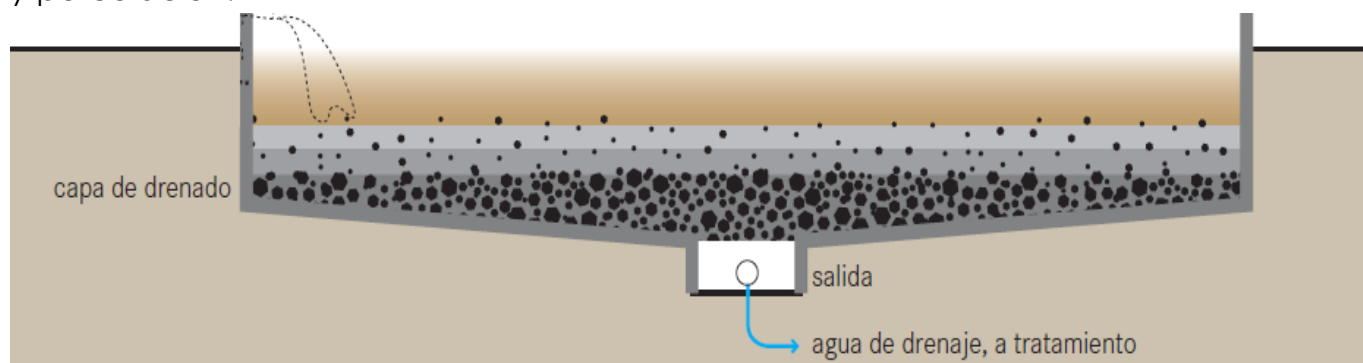


Figura 2. Sección transversal celda de lechos de secado convencional de arena Tomado de Tilley et al. (2014)

Una vez estabilizados, los lodos son depositados sobre los lechos de secado con alturas que pueden oscilar entre 20 a 30 cm, dejándose secar hasta alcanzar un contenido de sólidos que puede variar entre 30 a 50%, posteriormente son retirados manual o mecánicamente para que, de acuerdo con sus características y uso final, se realicen tratamientos adicionales, o sean llevados directamente a disposición final; el filtrado normalmente suele retornar a cabeza de planta (Bassan et al., 2014; Foladori et al., 2013; Lawrence et al., 2007)

3.6.1 Mecanismos de Deshidratación en los Lechos

Los mecanismos responsables de la deshidratación y secado de los lodos en los lechos de secado consisten en la percolación por gravedad a través del medio poroso, y evaporación por radiación-convección, tal como se ilustra en la Figura 3.

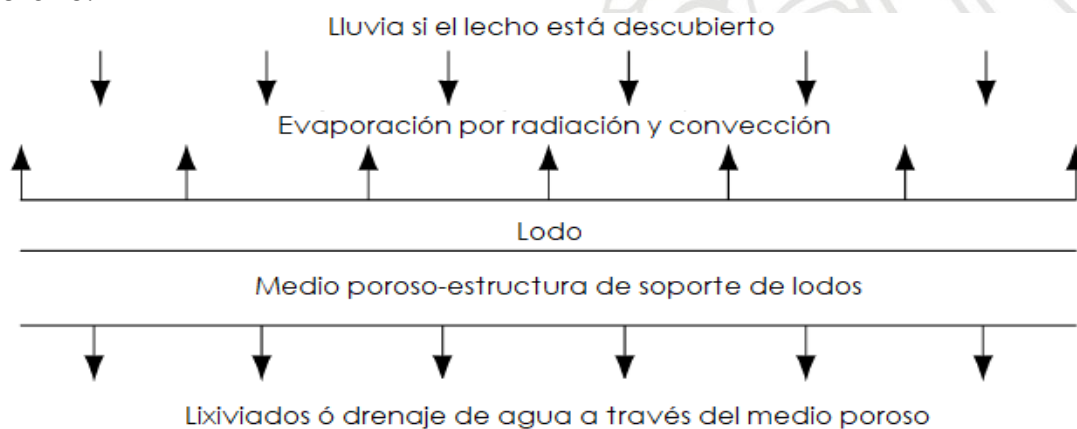


Figura 3. Representación esquemática del mecanismo de deshidratación de lodos en lechos de secado.

Tomado de Lawrence et al., (2007)

En una primera etapa, gracias a que los lodos tienen un gran porcentaje de agua libre, esta percola a través del medio poroso; dependiendo de las características del lodo este proceso puede tardar entre 12 y 18 horas, dando como resultado una suspensión pantanosa que puede tener hasta un 20% de contenido de sólidos (Ortega et al., 2010). Luego el agua que no percola ha de evaporarse gracias a los fenómenos de radiación y convección. Esta fase es más lenta y genera una disminución de la capa de lodos, llegando a agrietar la superficie de la torta de lodos, de manera que se favorece la evaporación del agua de las capas inferiores, al ser las grietas cada vez más profundas. Al final de esta etapa, el lodo adquiere una consistencia que permite ser retirado de manera manual mediante palas. Dependiendo de las condiciones climáticas este proceso puede durar semanas e incluso meses. Heiness et al. (1998) presentaron un informe donde mencionan que la proporción de agua extraída de los lodos por el mecanismo de percolación varía del 50 al 80%, dependiendo del contenido inicial de sólidos en el lodo y de las características de estos, y en un 20 a 50% por evaporación, dependiendo de la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire.

3.6.2 Factores que Afectan el Rendimiento

Los mecanismos de eliminación de agua imponen una serie de factores y variables operativas que afectan el rendimiento y diseño de los lechos de secado, como lo son de manera abreviada: los factores climáticos, el periodo de secado, la operación a cielo abierto o con cubierta, la tasa de carga de lodos, el grosor de la capa de lodos aplicada y el área requerida, siendo este el parámetro de diseño crítico para la construcción de los lechos de secado para lograr el contenido final de sólidos en el lodo dentro de un tiempo específico (Bassan et al., 2014; McFarland, 2001).

Factores climáticos: Los factores climáticos regionales influyen en gran medida sobre el rendimiento y la operación de los lechos de secado. Generalmente, el tiempo de secado es más corto en regiones con abundante sol, poca pluviosidad y poca humedad (WEF, 2018). Los valores altos de pluviosidad pueden disminuir la factibilidad de la implementación de los lechos. En lugares con épocas lluviosas marcadas, se podría abstener de operar los lechos de secado en esa época o simplemente se podría instalar un techo (Dodane & Ronteltap, 2014).

Periodo de secado: El periodo de secado requerido depende de la naturaleza del lodo, las condiciones climáticas, la cobertura o no de los lechos, el contenido final de humedad deseado y el método de eliminación de sólidos o el uso final de los biosólidos (WEF, 2018). Este periodo oscila entre 20 y 75 días, siendo posible reducirlo si se realiza el volteo de los lodos (Villaseñor Gándara, 1995).

Tasa de carga de lodos: Representa la masa de sólidos que se seca sobre un metro cuadrado de lecho y es expresada en kg ST/ m² *año. El rango de valores para esta tasa varía por lo general de 100 a 200 kg ST/ m² *año para climas tropicales, mientras que solo unos 50 kg ST/ m² *año son aplicados con frecuencia en los climas templados de Europa (Pescod, 1971).

Grosor de capa de lodos: Generalmente los lodos suelen disponerse en capas entre 20 a 45 cm de grosor. Dodane & Ronteltap (2014) mencionan que puede ser contraproducente aplicar capas más gruesas de lodo, puesto que estudios previos determinaron que al incrementar la capa 10 cm, el tiempo de secado puede hasta duplicarse, bajo las mismas condiciones climáticas.

Área de superficie requerida: El área de los lechos de secado consiste en la superficie mínima requerida para que se lleve a cabo el proceso de deshidratación de lodos; Metcalf & Eddy afirman que el área de los lechos de secado se puede basar en la tasa de carga de lodos, que se calcula per cápita o en unidad de carga de masa de sólidos secos por unidad de área por año; sin embargo, también se han de considerar los parámetros anteriormente mencionados y el ritmo de secado de los lodos.

Tabla 4. Valores Típicos de Áreas Necesarias para Lechos de Secado

Tipo de lodo	Superficie m ² /per capita	Carga de lodo kg ST / m ² * año.
Primario digerido	0,1-0,15	122-146
Primario y de filtros percoladores digeridos	0,125-0,175	88-122
Primario y lodo activado en exceso digeridos	0,175-0,25	58-98
Primario y de precipitación química digeridos	0,20-0,25	98-161

Tomado de Metcalf & Eddy, (2007)

Los lechos que operan a cielo abierto requieren mayor área superficial que los lechos cubiertos; de igual modo, los requerimientos de terreno suelen ser inferiores en climas cálidos (Wang et al., 2007). Conviene recalcar que la poca disponibilidad de terreno limita la implementación de los lechos de secado convencionales. En la Tabla 4 se presentan los valores típicos de las áreas requeridas per cápita, para diferentes tipos de lodos en regiones templadas.

3.6.3 Detalles Constructivos

En la Figura 4 se muestra un corte transversal que muestra los principales detalles constructivos del lecho de secado, estos detalles se listan como sigue:

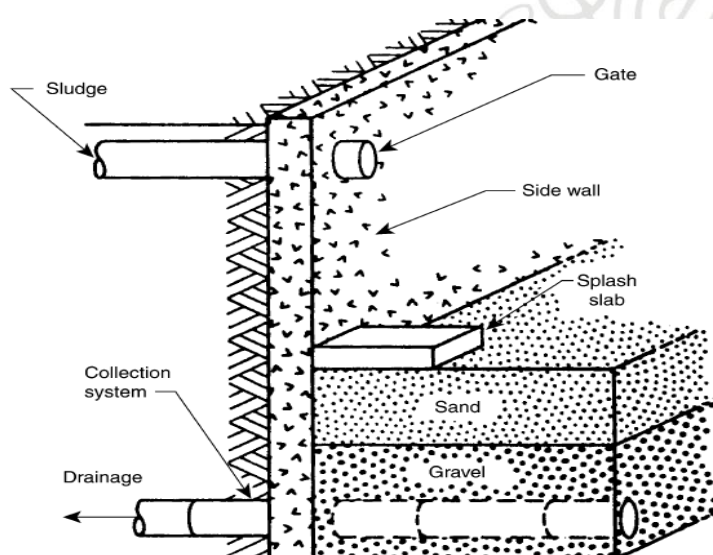


Figura 4. Detalle constructivo lecho de secado.
Tomado de WEF, (2018)

- ✓ El bloque de salpicaduras o deflector se ubica en cada punto de entrada de lodos, tal como se muestra en la Figura 4. Este asegura la distribución uniforme de los lodos, dispersa la fuerza con la que sale el chorro de lodos y protege el material filtrante. Si se omite este detalle se corre el riesgo de que la capa de arena sea destruida con la primera carga de lodos (Bassan et al., 2014).
- ✓ Respecto al material filtrante, se debe colocar una capa de arena con espesores de al menos 30 cm (sin embargo, en algunos casos utilizan capas de hasta 46 cm para prolongar la vida útil del lecho), sobre una capa de grava que ha de tener un espesor entre 30 y 46 cm. Respecto a la granulometría de la arena, se recomienda un Tamaño Efectivo (TE)

entre 0,3 – 1,2 mm y un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 3,5 a 5,0; mientras que la granulometría de la grava ha de clasificarse dentro de un Tamaño Efectivo 3 a 25mm (Lin, 2014; Mackenzie et al., 2019)

- ✓ Bajo el material filtrante deben instalarse tuberías de drenaje lateral (tuberías de plástico perforadas) para el drenaje de lixiviados, esta tubería debe tener como mínimo un diámetro de 10 cm, estar espaciadas entre sí de 2 a 6 m, además de tener una pendiente mínima del 1% para asegurar una rápida eliminación de la humedad (Mackenzie et al., 2019; Metcalf & Eddy, 1998).

4. METODOLOGÍA

Dado que el objetivo del presente estudio fue “evaluar el dimensionamiento de los lechos de secado de las PTAR del área urbana de los municipios San Francisco, Santo Domingo, San Vicente, Granada y el corregimiento de la Piñuela, en el departamento de Antioquia”, se abordó la metodología mediante la implementación de una serie de fases, las cuales se describen a continuación.

4.1 Metodologías de Dimensionamiento

Antes de ahondar en los problemas de dimensionamiento de cada PTAR se realizó una revisión de la literatura y de los documentos normativos relacionados con la gestión de lodos y el diseño de los lechos de secado. De manera que se estudiaron los criterios para el uso de biosólidos generados en las PTAR y que se presentan en el Decreto 1287 de 2014, la metodología propuesta en el Artículo 211 de la Resolución 0330 de 2017 para el dimensionamiento de los lechos de secado, los textos “Sludge Treatment and Disposal” y “Biosolids and Sludge processing”, entre otros con el fin de identificar diferentes métodos de diseño de los lechos de secado, aplicables a las condiciones tropicales.

4.2 Identificación y Diagnóstico Inicial

Se llevaron a cabo varias visitas de campo con la finalidad de identificar las PTAR (Figura 5), las unidades de tratamiento que las conforman y estar al tanto del detalle del proceso de generación de lodos. Los lugares objeto de estudio fueron los siguientes:



Figura 5. Localización de las PTAR objeto de estudio

- ✓ La PTAR La Piñuela se encuentra ubicada al sur del corregimiento La Piñuela del municipio de Cocorná, camino a la vereda Majagual; la coordenada UTM para este lugar es 18 N 484162 664375.
- ✓ La PTAR del municipio de Granada, se encuentra al este del municipio de Granada, del departamento de Antioquia, la coordenada UTM para este sitio es 18 N 479880 679152 y el vertido final es descargado a la de la quebrada Santa Bárbara. Mediante las visitas a campo se identificaron las unidades que conforman las PTAR, asimismo se recopiló información de los estudios de diseño para el Plan Maestro de Alcantarillado.
- ✓ La PTAR del municipio San Francisco se encuentra en la zona sur de dicho municipio, la coordenada UTM para este sitio es 18 N 488625

658784, la fuente receptora del efluente de la PTAR es la quebrada llamada "La Tripa". Se recopiló información de los estudios de optimización y construcción del sistema de aguas residuales del municipio; luego en las visitas de campo se logró identificar las unidades de tratamiento que conforman la PTAR.

- ✓ La PTAR del municipio San Vicente de Ferrer se encuentra al sureste de dicho municipio, la coordenada UTM para este lugar es 18 N 463680 693546, la quebrada El Salado es la fuente receptora de los efluentes de la PTAR. Se examinó y extrajeron datos relevantes el Informe de referentes ambientales elaborado por Cornare, luego en las visitas de campo se logró identificar las unidades de tratamiento que conforman la PTAR.
- ✓ La PTAR del municipio de Santo Domingo está ubicada al sur del municipio, la coordenada UTM para este sitio es 18 N 481704 714744, la quebrada San Miguel es la fuente receptora de los efluentes de la PTAR. Se revisaron las memorias de cálculo de la PTAR y se extrajeron datos relevantes para el dimensionamiento de los lechos de secado.

4.3 Recopilación de Información

Se consultaron las memorias de cálculo y planos de diseño de los lechos de secado, se realizaron mediciones a los lechos de secado construidos para comparar con el diseño original y finalmente, se indagó acerca de los tiempos de secado para los lodos, y el uso final de los biosólidos. Por otro lado, teniendo como base el Mapa Raster de Evaporación Real derivado del POMCA del 2007 y la georreferenciación para cada PTAR, se adquirieron los datos de Evaporación.

4.4 Estimación de Áreas Requeridas

El predimensionamiento de los lechos de secado se realizó de acuerdo con las unidades de tratamiento existentes en cada PTAR, la población proyectada al periodo de diseño, estimación de cantidades de lodos biológicos generados en cada reactor UASB o digestor de lodos, en las PTAR donde se efectuaban purgas se hizo seguimiento a las alturas de lodo purgado a los lechos de secado y a la masa posterior al proceso de deshidratación, los datos recolectados se usaron para dimensionar los lechos de secado mediante los modelos y metodologías usadas se describen a continuación:

3.4.1 Indicación Res 0330/ 2017

El Artículo 211 de Res 0330 de 2017 "Requisitos mínimos de diseño para procesos de manejo de lodos en las PTAR" indica los requerimientos de área para lechos de secado. En el caso de lodo primario digerido, que es lo que se tiene en los reactores UASB y en los digestores de lodos, este artículo recomienda 0,1m²/persona y una carga de sólidos entre 120-150 kg/m² *año de sólidos secos si los lechos van a ser a cielo abierto. Estos valores se pueden reducir al 75% cuando los lechos son cubiertos.

De manera que los requerimientos de área para lechos de secado cubiertos se calcularían como se muestra a continuación.

$$A = 0.075 * P \quad (6)$$

Dónde

- A** = área superficial del lecho de secado, m²
0.075 = factor recomendado si los lechos van a estar cubiertos
P = población proyectada al periodo de diseño

3.4.2 Dimensionamiento Basado en Cargas Superficiales de Lodo

Este método utiliza tasas empíricas derivadas de la experiencia en aplicaciones similares u obtenidas mediante pruebas realizadas en condiciones controladas. Se utilizaron entonces los parámetros de la Tabla 2 donde se presenta la carga y la concentración de sólidos a través de varias etapas de tratamiento de los lodos y es aplicable a las condiciones tropicales.

$$M_s = (P)(PPC_{SST}) \quad (7)$$

Dónde

- M_s** = carga de sólidos en el lodo, kg SST/d
P = población proyectada al periodo de diseño, hab
PPC_{SST} = producción per cápita de sólidos suspendidos totales, (12-18) g SST/ hab * d

$$Q_s = (P)(PPC_{Vol}) \quad (8)$$

Dónde

- Q_s = caudal de lodo, m³/d
 P = población proyectada al periodo de diseño, hab
 PPC_{vol} = producción volumétrica de lodos per cápita,
 (0.2-0.6) L / hab * d

$$T = T_d + T_c \quad (9)$$

Dónde

- T = tiempo del ciclo operacional, días
 T_d = tiempo de secado, días
 T_c = tiempo de limpieza, días

$$V_s = Q_s * T \quad (10)$$

Dónde

- V_s = volumen de lodos deshidratado por ciclo, m³ /ciclo

$$A = \frac{M_s * T}{SLR} \quad (11)$$

Dónde

- A = área superficial requerida de lechos de secado, m²
 SLR = carga de sólidos, Kg SS/m²

$$H_s = \frac{V_s}{A} \quad (12)$$

Dónde

- H_s = altura de la capa de lodo después de carga, m

3.4.3 Dimensionamiento Basado en Productividad

El dimensionamiento basado en productividad fue propuesto por van Haandel & van der Lubbe (1994), relaciona la carga de sólidos aplicada (Kg ST/m²) y el periodo de secado para un contenido de humedad específico. Para lodos generados en reactores UASB con un contenido de agua del 70%, el valor de la productividad es de 1.65 Kg ST/m²*d en regiones calientes y de 0.55 Kg ST/m² *d en climas templados. La carga de sólidos que será aplicada es en función de las condiciones de operación deseadas, es decir, del contenido de humedad final, los ciclos de deshidratación y la altura de los lodos, se recomienda una carga de sólidos de 15 Kg ST/m². Las áreas de lechos de secado mediante este método se calculan como sigue:

$$M_{\text{lodos}} = V_{\text{lodos}} * SC_i * \rho_s \quad (13)$$

Dónde

M_{lodos} = Masa de sólidos que será removido, kg ST

V_{lodos} = Volumen de lodos a ser removidos, m³

SC_i = Contenido inicial de sólidos, %

ρ_s = densidad del lodo, kg/m³

$$T = \frac{SLR}{P} \quad (14)$$

Dónde

T = tiempo del ciclo operacional, días

SLR = carga de sólidos, Kg SS/m²

P = productividad

$$A = \frac{M_{\text{lodos}}}{P * T} \quad (15)$$

Dónde

A = área superficial requerida de lechos de secado, m²

$$H = \frac{V_{\text{lodos}}}{A} \quad (16)$$

Dónde

H = altura de lámina de lodos, m

3.4.4 Dimensionamiento Basado en Balance de Masa de Cornwell y Vandermeiden

El modelo de Cornwell y Vandermeiden (1999), que se basa en un balance de masa mensual. Las ecuaciones de trabajo para el modelo son las siguientes:

$$H_f = (H_i) \left[\frac{S_i}{S_f \text{ ar}} \right] \quad (17)$$

Dónde

H_f = altura de los lodos después de eliminar el agua libre, m

H_i = altura inicial de capa de lodos aplicada, m

- S_i = contenido inicial de sólidos, %
 S_f = contenido final de sólidos luego de drenar el agua, %

$$\Delta H_e = (H_f) - \left[\frac{(H_f)(S_f)}{S_f} \right] \quad (18)$$

- Dónde
 ΔH_e = cambio de altura de los lodos causado por evaporación, m
 S_f = contenido final de sólidos deseado

$$L = (H_i)(S_i)(\rho) \quad (19)$$

- Dónde
 L = carga de lodos, kg/m²
 ρ = densidad del lodo, kg/m³

$$A = M_s(t) / L \quad (20)$$

- Dónde
 A = área superficial requerida de lecho de secado, m²
 $M_s(t)$ = masa de sólidos secos producidos mensualmente, kg/mes

4.5 Comparación de Áreas Estimadas con las Áreas Construidas

Acorde con los datos obtenidos, observaciones realizadas en campo y áreas arrojadas por las metodologías empleadas, se compararon las dimensiones de los lechos construidos con las estimaciones realizadas, estableciendo si es suficiente o no el área construida de lechos en cada PTAR, además se evaluaron las condiciones operativas de los lechos de secado.

4.6 Soluciones

Finalmente, luego de determinar las problemáticas existentes, se plantearon soluciones en aras de mejorar las condiciones de diseño y operativas de los lechos de secado.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Identificación y Diagnóstico inicial

4.1.1 PTAR La Piñuela

Según información suministrada por uno de los diseñadores, la PTAR fue diseñada en el año 2007 para un caudal de 2 l/s. En los documentos donde se justifican las proyecciones poblacionales se tiene que la PTAR fue diseñada para un periodo de 20 años y una población de 798 habitantes, sin embargo, al confrontar el dato de población proyectada con la suministrada por la oficina del SISBEN, se tiene que la población supera en un 38,5% a la proyectada (dado que el dato de población al 2018 según la oficina del SISBEN fue de 952 habitantes y la población proyectada a ese mismo año fue de 586 habitantes).

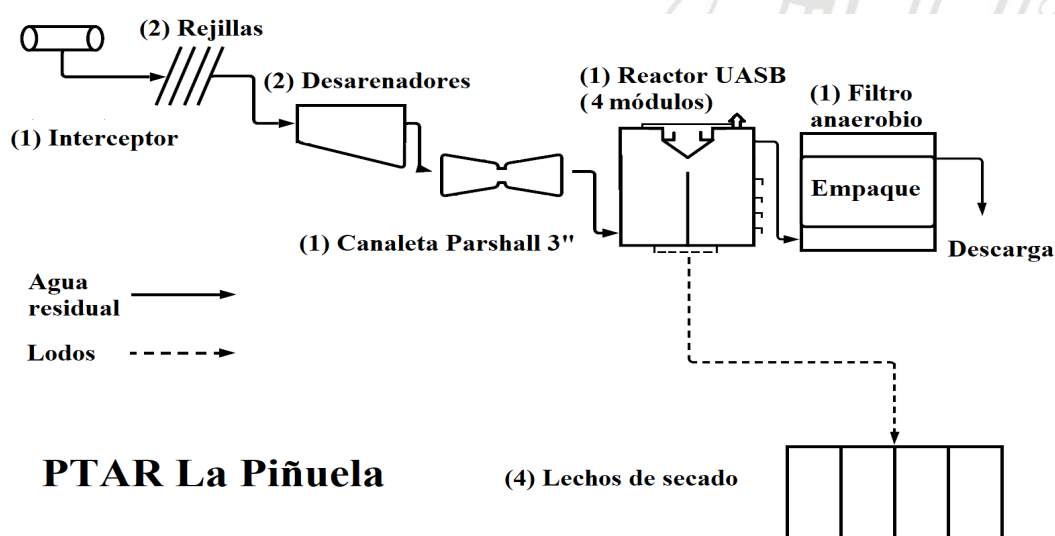


Figura 6. Diagrama de flujo PTAR Piñuela
Tomado de Ramirez et al., (2021)

Se identificó que las unidades de tratamiento con las que cuenta la PTAR son un tratamiento preliminar compuesto por dos rejillas de cribado, dos canales desarenadores en paralelo, seguidos de una canaleta Parshall de 3", un reactor UASB, un FAFA y cuatro celdas de lechos de secado cubiertas, tal como se muestra en la Figura 6, sin embargo, los únicos lodos biológicos que ingresarían a los lechos de secado son los correspondientes a las purgas del reactor UASB, puesto que el FAFA no cuenta con válvula de purga para

evacuar los lodos. Los lixiviados de los lechos de secado se dirigen a la fuente receptora sin ningún tratamiento previo.

Por otro lado, se evidenció la imposibilidad de ingreso del carro recolector de residuos a la PTAR, por lo que el material proveniente de la limpieza del desarenador era llevado a los lechos de secado mientras resulta otra alternativa, tal como se muestra en la **Figura 7**. Dicho material ocupaba dos de las cuatro celdas de secado y tenía olor característico a los procesos de degradación de la materia orgánica, así como presencia de vectores. A futuro pueden presentarse inconvenientes con este material, dado que los lechos no fueron dimensionados para estos usos y su capacidad podría verse limitada si no se encuentran otras alternativas.



Figura 7. Material de canal desarenador dispuesto en lechos de secado La Piñuela

4.1.2 PTAR Granada

Dentro de la información recopilada se encontró que la PTAR fue diseñada en el año 1999, la población proyectada para el periodo de diseño fue de 6440 habitantes y el caudal de diseño fue de 20 L/s. Actualmente tiene una cobertura superior al 90% del área urbana de Granada y cuenta con un tratamiento preliminar compuesto por dos rejillas de cribado con sus respectivas canastillas, dos canales desarenadores en paralelo, seguidos de una canaleta Parshall de 3", dos módulos de sedimentadores primarios, dos FAFA, un digestor de lodos y cuatro celdas de lechos de secado cubiertas, tal como se evidencia en la Figura 8 (Macías et al., 2021).

Respecto al detalle del proceso de generación de lodos se identificó que los lodos generados en el sedimentador primario pasan al digestor de lodos y luego de digeridos pasan a los lechos de secado; a su vez, la purga de lodos procedentes de los FFAA es descargada directamente a los lechos. Los lixiviados de los lechos son vertidos directamente a la quebrada Santa Barbara.

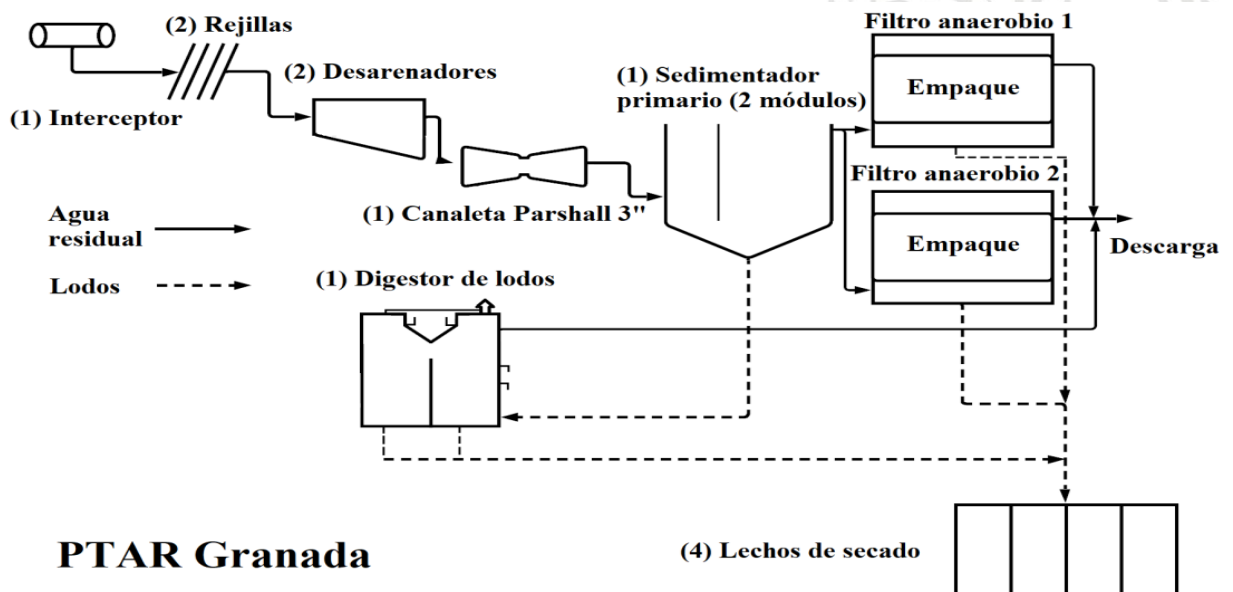


Figura 8. Diagrama de flujo PTAR Granada
Tomado de Macías Ospina et al., (2021)

Así mismo, se logró evidenciar al realizar las purgas de lodos que existe un desnivel en las celdas de los lechos de secado, lo cual genera dificultades en el proceso de purga y deshidratación de lodos. De manera que la celda con mayor desnivel es usada frecuentemente para evacuar el lodo restante de la estructura previa a los lechos de secado.



Figura 9. Desnivel evidenciado en una de las celdas de secado de PTAR Granada

4.1.3 PTAR San Francisco

Se encontró información de estudios de optimización y construcción del sistema de aguas residuales del municipio, donde el caudal de diseño fue de 5 L/s, la población proyectada al año 2036 es de 5690 habitantes, sin embargo, en vista de que la PTAR tiene una cobertura del 25% del área urbana del municipio, la población que se proyecta atender al año 2036 es de 1423 habitantes (Fuentes, 2011). Respecto a las unidades de tratamiento que conforman la PTAR se encontró que cuenta el sistema preliminar compuesto por dos rejillas de cribado, dos canales desarenadores en paralelo y una canaleta Parshall de 3", un reactor UASB, dos FAFA en PRFV y cuatro celdas de lechos de secado cubiertas, tal como se muestra en la Figura 10 (Mesa Ariza et al., 2020). Las purgas de lodos procedentes del reactor UASB y los de los FAFA son descargadas sobre los lechos de secado para su deshidratación. Los lixiviados generados en este proceso van a directamente a la quebrada llamada "La Tripa".

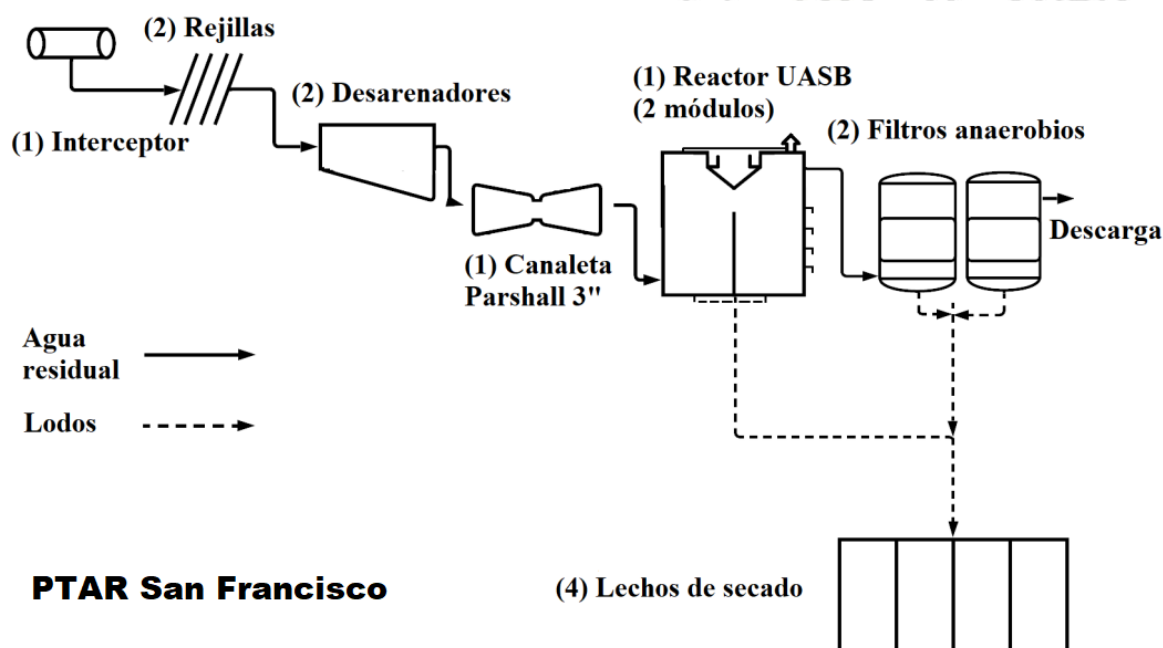


Figura 10. Diagrama de flujo PTAR "La Tripa 2"
Tomado de Mesa Ariza et al., (2020)

4.1.4 PTAR San Vicente Ferrer

Dentro informe de referentes ambientales realizado por Cornare, se encontró que en la actualidad la PTAR trata el 85% del agua residual urbana del municipio de San Vicente Ferrer. Así mismo, en las memorias de cálculo se encontró que La PTAR fue diseñada en el año 2013, para caudal de 36,81 L/s,

la población proyectada al año 2038 fue de 12027 habitantes. Tal como se muestra en la Figura 11, esta PTAR cuenta con un tratamiento preliminar compuesto por dos rejillas de cribado con sus respectivas canastillas, dos desarenadores en paralelo y una canaleta Parshall de 6" para el aforo del caudal, posteriormente se encuentra el sistema de bombeo que direcciona el agua hacia el tratamiento biológico, dos reactores UASB, dos FAFA, y diez celdas de lechos de secado cubiertas (Salgado et al., 2021).

En esta PTAR los lodos que se deshidratan en los lechos de secado son los procedentes de las purgas de los reactores UASB, los filtros anaerobios y de los sedimentadores secundarios. Cada celda del lecho cuenta con una caja de inspección, los lixiviados generados en los lechos son retornados a cabeza de planta para su tratamiento.

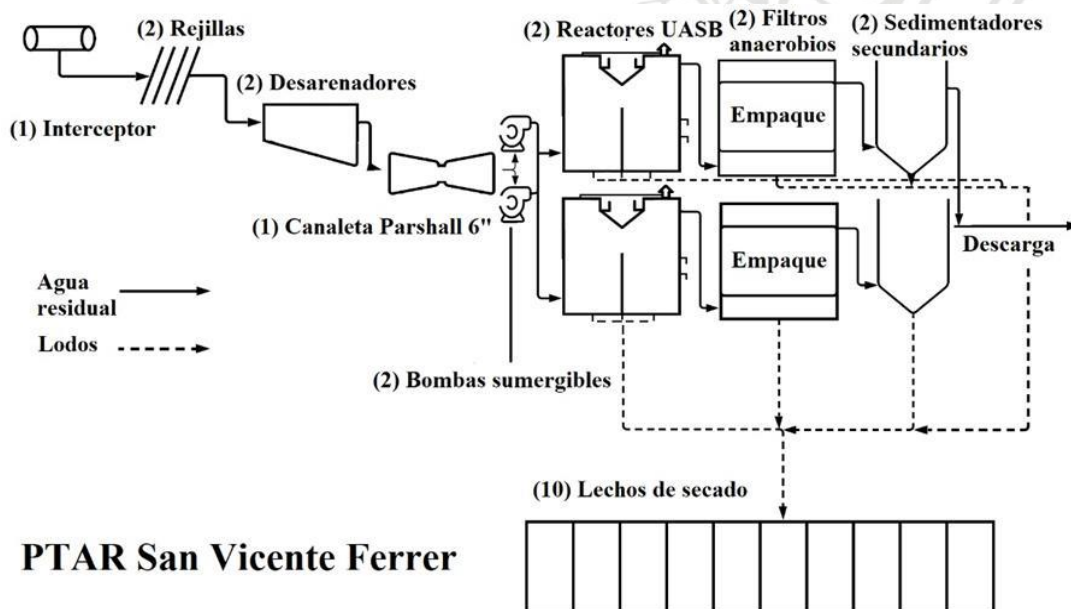


Figura 11. Diagrama de flujo PTAR San Vicente Ferrer
Tomado de Salgado Martínez et al., (2021)

4.1.5 PTAR Santo Domingo

Se encontraron las memorias de cálculo de la PTAR, en ellas se identificó que el caudal de diseño fue de 11.55 L/s y la población proyectada al año 2037 fue de 3130 habitantes. Esta PTAR tiene la particularidad de tener el sistema preliminar subterráneo que cuenta con dos unidades de cribado, cada uno con su respectiva compuerta tipo guillotina y las canastillas de recolección, dos desarenadores en paralelo y una estación de bombeo que direcciona el agua hacia el tratamiento biológico, un reactor UASB, dos filtros anaerobios

que funcionan en serie y tres celdas de lechos de secado cubiertas (Rojas et al., 2020).

Tal como se muestra en la Figura 12, para esta PTAR se tiene que los lodos que ingresan a deshidratación en los lechos de secado son los provenientes de las purgas realizadas en el reactor UASB y en los filtros anaerobios. Los lixiviados de los lechos son descargados sin ningún tratamiento sobre la quebrada San Miguel.

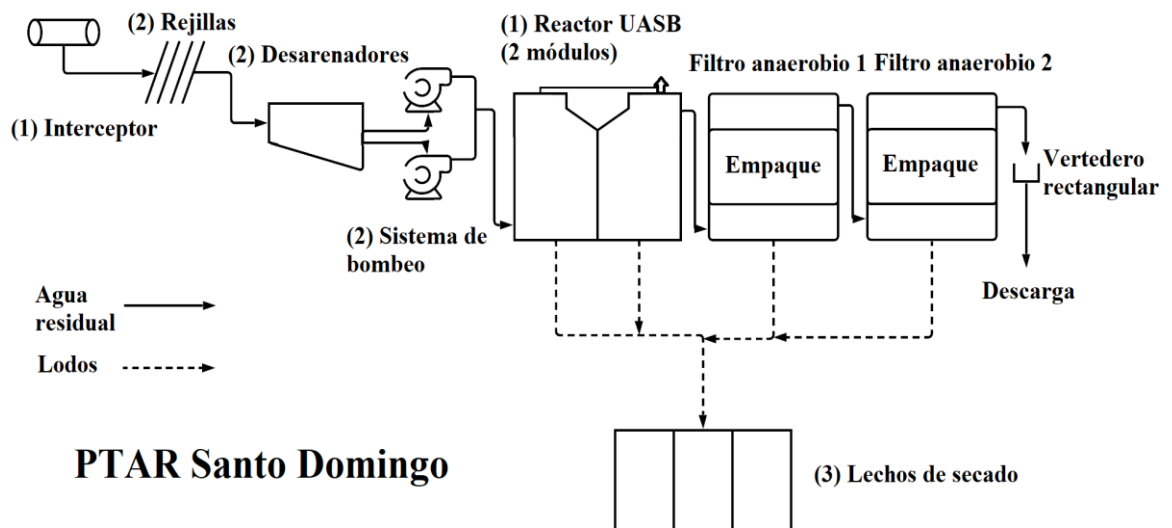


Figura 12. Diagrama de flujo PTAR Santo Domingo
Tomada de (Rojas, 2020)

5.2 Recopilación de Información

Para los lechos de secado de **La Piñuela** se encontraron los planos constructivos de los lechos de secado, sin embargo, no se logró tener acceso a las memorias de cálculo que sustentan el dimensionamiento de los lechos. En los planos constructivos se evidencia que fueron diseñadas 4 celdas para el secado de lodos con un área total correspondiente a 18,7 m², sin embargo, al contrastar estas dimensiones con las de los lechos construidos se tiene que hay una diferencia de 2,7 m² puesto que el área medida en campo corresponde a 16 m².

En el caso de la PTAR de **Santo Domingo** solo se obtuvieron los planos constructivos. En estos se encontró que fue proyectada la construcción de 6 celdas para el secado de lodos, el área total ocupada por estas en los planos era de 14 m², sin embargo, en las visitas de campo se encontraron 3

lechos de secado de un área diferente a la proyectada en planos; al realizar las mediciones de los lechos se encontró una diferencia de 2 m² del área construida respecto al área diseñada, puesto que el área construida es de 12 m², tal como se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Dimensiones de lechos de secado construido Santo Domingo

De manera similar, en la PTAR de **San Francisco** no se encontraron las memorias de cálculo para los lechos de secado, pero si los planos de diseño, en estos se tiene que el área para lechos de secado corresponde a 12,42 m², medida que corresponde al área construida, tal como se ilustra en la Figura 14.

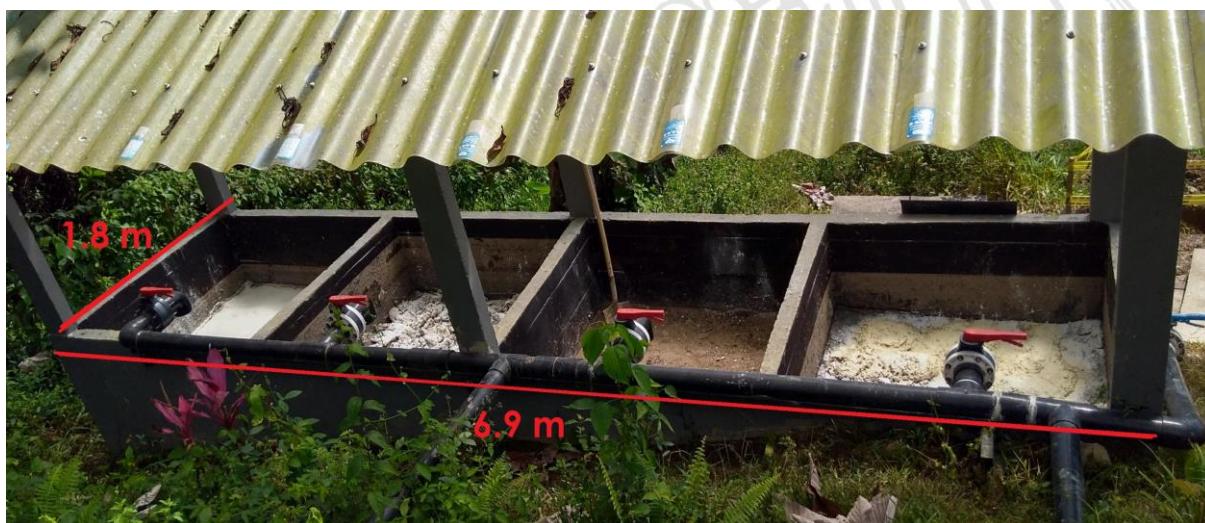


Figura 14. Dimensiones de lechos de secado construido PTAR San Francisco

Para las PTAR La Piñuela, Santo Domingo y San Francisco no se pudieron obtener datos respecto al tiempo de secado de los lodos, altura de capas de lodos, ni uso final de los biosólidos, dado que éstas estaban aún en etapa de arranque y estabilización.

En el caso de la PTAR del municipio de **Granada** se encontraron las memorias de cálculo y los planos de diseño de los lechos de secado; en las memorias de cálculo se identificó que el área de lechos se calculó per cápita, utilizando la relación $1\text{m}^2 / 300 \text{ hab.}$. De manera que el área para la deshidratación y el secado de lodos según los cálculos para 6440 habitantes fue de 21m^2 ; sin embargo, el área útil total de lechos correspondiente al diseño y al área construida es de 24 m^2 , tal como se ilustra en la **Figura 15**. Al indagar acerca del tiempo de secado de lodos se encontró que tardan alrededor de 26 días en deshidratarse, la altura inicial de la torta de sólidos es de 40 cm; el lodo ya deshidratado se dispone en trincheras dentro de la PTAR dado que las características de este hacen que no sea posible un uso en tierras agrícolas.



Figura 15. Dimensiones de lechos de secado construido PTAR Granada

En **San Vicente Ferrer** se encontraron tanto las memorias de cálculo como planos constructivos. Se identificó que los lechos fueron diseñados teniendo como base la productividad de lodos en el reactor UASB ($5,77 \text{ m}^3/\text{d}$) y

considerando porcentajes de 23% de sólidos y un 77% de agua del volumen total; con esto se llegó a que el área suficiente para los lechos era de 140 m², estas medidas corresponden a las dimensiones de los lechos en los planos récords y fueron corroboradas en campo, tal como se muestra en la **Figura 16**. Por otro lado, en las visitas en campo se encontró que los lodos tienen tiempo de secado de aproximadamente 10 días y la altura inicial de las capas de lodos siempre fue de 10cm. Según información suministrada por el personal operativo, los biosólidos, son entregados a un tercero que los usa como mejorador de suelos erosionados por la actividad ladrillera.



Figura 16. Dimensiones de lechos de secado construido PTAR San Vicente
Fotografía tomada por Jessica Vargas

La Tabla 5 resume los datos expuestos en los párrafos anteriores. El hecho de que no se encuentren las memorias de cálculo de los lechos de secado en las PTAR Santo Domingo, San Francisco y la Piñuela, genera incertidumbre respecto al adecuado dimensionamiento de estos. Sin embargo, en la PTAR Granada para la cual se encontraron tanto memorias de cálculo como planos constructivos, se evidencio mediante las visitas de campo que el área construida de los lechos no alcanza a dar abasto para la cantidad de lodos que se requiere purgar, lo cual genera problemas en el digestor de lodos como flotación de lodos y lo cual puede generar implicaciones en el rendimiento adecuado de la PTAR.

Tabla 5. Síntesis de información recolectada de las PTAR objeto de estudio.

PTAR	Población proyectada	Área en memorias cálculo	Área en planos constructivos	Área realmente construida	Tiempo de secado de lodos	Altura inicial torta de lodos	Evaporación mínima mm/mes
La Piñuela	-	-	18,7 m ²	16 m ²	-	-	100.25
Granada	6440	21 m ²	24 m ²	24 m ²	30 días	40 cm	107.38
San Francisco	1423	-	12,42 m ²	12,42 m ²	-	-	99.55
San Vicente	8407	140 m ²	140 m ²	140 m ²	15 días	15 cm	104.03
Sto. Domingo	3130	-	14 m ²	12 m ²	-	-	90.89

5.3 Estimación de Áreas Requeridas

Para hacer la estimación de áreas se utilizaron las indicaciones del Artículo 211 de Res 0330 de 2017, la metodología basada en cargas superficiales de lodo, la metodología basada en productividad y el modelo de Cornwell y Vandermeijden que se describen en la sección de metodología. Los cálculos que se muestran a continuación se encuentran en la hoja de cálculo anexa.

4.3.1 La Piñuela

En la Tabla 6 se muestra la estimación de área para los lechos de secado de la PTAR la Piñuela usando las indicaciones del Artículo 211 de Res 0330 de 2017, con un resultado de 60 m².

Tabla 6. Estimación de área para la Piñuela usando el Art. 211 Res 0330/ 2017

Área requerida per capita RAS 2017	0,075 m ² / hab
Área requerida bajo Art 211 Res 0330	60 m ²

La Tabla 7 muestra la estimación de área teniendo como criterio el método de cargas superficiales de lodo, en este caso el resultado final corresponde a un área de 19 m², mucho menor que la calculada en la Tabla 6.

Tabla 7. Estimación de área la Piñuela usando cargas superficiales

1. Cantidad de lodo a deshidratar	
Carga volumetrica de lodo per capita UASB	18 g SS / hab*d
PPC de volumen de lodo UASB	0,4 L / hab*d
Flujo másico de lodo UASB (M _s)	14.364 gr SS / d 14 kg SS / d

Flujo volumétrico de lodos UASB	(Q_s)	319 L / d 0,32 m ³ / d
2. Lodo producido en cada ciclo operacional		
Tiempo de secado	(T_d)	15 d
Tiempo de limpieza	(T_c)	5 d
Tiempo por ciclo	(T)	20 d
Volumen de lodo deshidratado por ciclo	(V_s)	6,384
3. Área requerida		
Carga de lodo	(SLR)	15 kg SS / d
Área requerida	(A)	19 m ²
Área requerida bajo cargas superficial de lodo		19 m ²

La tabla 8 muestra la estimación de área para la PTAR del corregimiento La Piñuela haciendo uso de la metodología de productividad, dicha estimación arroja como resultado un área de 34 m².

Tabla 8. Estimación de área para la Piñuela usando productividad

1. Cantidad de lodo a deshidratar		
Volumen de lodo fondo reactor		15,808 m ³
Volumen de lodo	(V_{lodos})	10,2752 m ³
Contenido inicial de sólidos	(SC_i)	0,05
Densidad de lodos		1020 kg / m ³
Masa de lodos	(M_{lodos})	524 kg
2. Productividad y carga acorde a clima y tipo de tratamiento biológico		
Productividad	(P)	1,65 kg ST / m ² * d
Tasa de carga de lodos	(SLR)	15 kg ST / m ²
3. Determinar el ciclo de deshidratación		
Tiempo del ciclo de deshidratación	(T)	10,00
Tiempo de ciclo calculado $T_a > T$	(T_a)	10
	$T_a > T$	Ok
4. Altura de la lamina de lodo		
Altura de la lamina de lodo	(H)	0,3 m
5. Área requerida		
Área requerida mediante productividad	(A)	34 m ²

La tabla 9 muestra la estimación de área de lechos de secado usando el Modelo de Cornwell & Vandermeijden, el resultado corresponde a un área de 28 m².

Tabla 9. Estimación de área La Piñuela usando Modelo de Cornwell & Vandermeijden

Masa de solidos secos producidos Ms	287 kg
Altura de los lodos despues de eliminar el agua libre	$H_f = (H_i) \left[\frac{S_i}{S_f dr} \right]$
Hf	0,14 m
Cambio de altura en lodos causado por Evaporación	$\Delta H_e = (H_f) - \left[\frac{(H_f) (S_f dr)}{S_f} \right]$
ΔHe	0,11 m
Carga de solidos (Cornwell)	$L = (H_i)(S_i)(\rho)$
L	18 kg / m ²
Área requerida	$A = \frac{M_s}{L} * F_s$
A	28 m ²

4.3.2 Granada

En la Tabla 10 se muestra la estimación de área para los lechos de secado de la PTAR del municipio de Granada usando las indicaciones del Artículo 211 de Res 0330 de 2017, con un resultado de 483 m².

Tabla 10. Estimación de área para Granada usando Art. 211 Res 0330/ 2017

Área requerida per capita	0,075 m ² / hab
Área requerida bajo Art 211 Res 0330	483 m ²

La Tabla 11 muestra la estimación de área teniendo como base el método de cargas superficiales de lodo, el resultado final corresponde a un área de 97 m², valor considerablemente inferior al mostrado en la tabla 10.

Tabla 11. Estimación de área para Granada usando cargas superficiales de lodo

1. Cantidad de lodo a deshidratar	
Carga volumetrica de lodo per capita digestor	15 g SS / hab*d
PPC de volumen de lodo digestor	0,4 L / hab*d
Flujo másico de lodo (M _s)	96.600 gr SS / d
	97 kg SS / d

Flujo volumétrico de lodo	(Q_s)	2.576 L / d 3 m ³ / d
---------------------------	-----------	-------------------------------------

2. Lodo producido en cada ciclo operacional

Tiempo de secado	(T_d)	10 d
Tiempo de limpieza	(T_c)	5 d
Tiempo por ciclo	(T)	15 d
Volumen de lodo deshidratado por ciclo	(V_s)	38,64

3. Área requerida

Carga de lodo	(SLR)	15 kg SS / d
Area requerida	(A)	97 m ²

La tabla 12 muestra la estimación de área de lechos de secado para la PTAR del municipio de Granada, haciendo uso de la metodología de productividad, dicha estimación arroja como resultado un área de 51 m².

Tabla 12. Estimación de área para Granada usando la productividad

1. Cantidad de lodo a deshidratar		
Volumen de lodo fondo reactor		23,4 m ³
Volumen de lodo	(V_{lodos})	15,21 m ³
Contenido inicial de solidos	(SC_i)	0,07
Densidad de lodos		1020 kg / m ³
Masa de lodos	(M_{lodos})	1086 kg
2. Establecer productividad y carga de acuerdo a clima y tipo de tratamiento biologico		
Productividad	(P)	1,65 kg ST / m ² * d
Tasa de carga de lodos	(SLR)	15 kg ST / m ²
3. Determinar el ciclo de deshidratación		
Tiempo del ciclo de deshidratación	(T)	10,00
Tiempo de ciclo calculado $T_a > T$	(T_a)	13
	$T_a > T$	Ok
4. Altura de la lamina de lodo		
Altura de la lamina de lodo	(H)	0,3 m
5. Área requerida		
Area requerida mediante productividad	(A)	51 m ²

En la tabla 13 se muestra la estimación de área mediante el Modelo de Cornwell & Vandermeijden, dicha estimación arroja un área de 79 m².

Tabla 13. Estimación de área para Granada usando Modelo de Cornwell & Vandermeijden

Masa de solidos secos producidos Ms

	1449 kg
--	---------

Altura de los lodos despues de eliminar el agua libre $H_f = (H_i) \left[\frac{S_i}{S_f dr} \right]$

Hf	0,14 m
----	--------

Cambio de altura en lodos causado por Evaporación $\Delta H_e = (H_f) - \left[\frac{(H_f) (S_f dr)}{S_f} \right]$

ΔH_e	0,11 m
--------------	--------

Carga de solidos (Cornwell)

$$L = (H_i)(S_i)(\rho)$$

L	18 kg / m ²
---	------------------------

Área requerida

$$A = \frac{M_s}{L} * F_s$$

A	79 m ²
---	-------------------

4.3.3 San Francisco

En la Tabla 14 se muestra la estimación de área para los lechos de secado de la PTAR “La Tripa II” del municipio San Francisco, usando las indicaciones del Artículo 211 de Res 0330 de 2017, con un resultado de 107 m²

Tabla 14. Estimación de área para San Francisco usando Art. 211 Res 0330/ 2017

Área requerida per capita	0,075 m ² / hab
Área requerida bajo Art 211 Res 0330	107 m ²

Así mismo en la Tabla 15 se muestra la estimación de área mediante cargas superficiales, el resultado final corresponde a un área de 21 m², mucho menor que el área calculada en la Tabla 14.

Tabla 15. Estimación de área para San Francisco usando cargas superficiales de lodo

1. Cantidad de lodo a deshidratar		
Carga volumetrica de lodo per capita UASB		15 g SS / hab*d
PPC de volumen de lodo UASB		0,4 L / hab*d
Flujo másico de lodo UASB	(M _s)	21.345 gr SS / d 21 kg SS / d
Flujo volumétrico de lodos UASB	(Q _s)	569 L / d 1 m ³ / d
2. Lodo producido en cada ciclo operacional		
Tiempo de secado	(T _d)	10 d
Tiempo de limpieza	(T _c)	5 d
Tiempo por ciclo	(T)	15 d
Volumen de lodo deshidratado por ciclo	(V _s)	8,538
3. Área requerida		
Carga de lodo	(SLR)	15 kg SS / d
Area requerida	(A)	21 m ²

Por otro lado, en la Tabla 16 se muestra el area estimada mediante la metodologıa de productividad, dicha estimación arroja un área superficial de 34 m².

Tabla 16. Estimación de área para San Francisco usando productividad

1. Cantidad de lodo a deshidratar		
Volumen de lodo fondo reactor		15,548 m ³
Volumen de lodo	(V _{lodos})	10,1062 m ³
Contenido inicial de solidos	(SC _i)	0,05
Densidad de lodos		1020 kg / m ³
Masa de lodos	(M _{lodos})	515 kg
2. Establecer productividad y carga de acorde a clima y tipo de tratamiento biologico		
Productividad	(P)	1,65 kg ST / m ² * d
Tasa de carga de lodos	(SLR)	15 kg ST / m ²
3. Determinar el ciclo de deshidratación		
Tiempo del ciclo de deshidratación	(T)	10,00
Tiempo de ciclo calculado Ta > T	(Ta)	10
	Ta > T	Ok

4. Altura de la lamina de lodo	(H)	0,3 m
5. Área requerida		
Area requerida mediante productividad	(A)	34 m ²

En la Tabla 17 se tiene la estimación de área de lechos de secado para la PTAR del municipio San Francisco, basada en Modelo de Cornwell & Vandermeijden, el resultado corresponde a 23 m².

Tabla 17. Estimación de área basada en Modelo de Cornwell & Vandermeijden

Masa de solidos secos producidos Ms		427 kg
Altura de los lodos despues de eliminar el agua libre	$H_f = (H_i) \left[\frac{S_t}{S_f dr} \right]$	
Hf		0,14 m
Cambio de altura en lodos causado por Evaporación	$\Delta H_e = (H_f) - \left[\frac{(H_f) (S_f dr)}{S_f} \right]$	
ΔHe		0,11 m
Carga de solidos (Cornwell)	$L = (H_i)(S_i)(\rho)$	
L		18 kg / m ²
Área requerida	$A = \frac{M_s}{L} * F_s$	
A		23 m ²

4.3.4 San Vicente Ferrer

En la Tabla 18 se muestra la estimación de área para los lechos de secado de la PTAR del municipio San Vicente de Ferrer usando las indicaciones del Artículo 211 de Res 0330 de 2017, con un resultado de 902 m².

Tabla 18. Estimación de área para San Vicente usando Art. 211 Res 0330/ 2017

Área requerida per capita	0,075 m ² / hab
Área requerida bajo Art 211 Res 0330	902 m ²

La tabla 19 muestra la estimación de área mediante la metodología de cargas superficiales, dicha estimación arroja un área de 180 m².

Tabla 19. Estimación de área para San Vicente usando cargas superficiales de lodo

1. Cantidad de lodo a deshidratar		
Carga volumetrica de lodo per capita UASB		15 g SS / hab*d
PPC de volumen de lodo UASB		0,4 L / hab*d
Flujo másico de lodo	(M _s)	180.405 gr SS / d 180 kg SS / d
Flujo volumétrico de lodos UASB	(Q _s)	4.811 L / d 5 m ³ / d
2. Lodo producido en cada ciclo operacional		
Tiempo de secado	(T _d)	10 d
Tiempo de limpieza	(T _c)	5 d
Tiempo por ciclo	(T)	15 d
Volumen de lodo deshidratado por ciclo	(V _s)	72,162
3. Área requerida		
Carga de lodo	(SLR)	15 kg SS / d
Area requerida	(A)	180 m ²
Área requerida bajo cargas superficial de lodo		180 m ²

La tabla 20 muestra la estimación de área mediante la metodología de productividad, dicha estimación arroja un área de 120 m².

Tabla 20. Estimación de área para San Vicente usando productividad

1. Cantidad de lodo a deshidratar		
Volumen de lodo fondo reactor		55,4 m ³
Volumen de lodo	(V _{lodos})	36,01 m ³
Contenido inicial de solidos	(SC _i)	0,07
Densidad de lodos		1020 kg / m ³
Masa de lodos	(M _{lodos})	2571 kg
2. Establecer productividad y carga acorde a clima y tipo de tratamiento biologico		
Productividad	(P)	1,65 kg ST / m ² * d
Tasa de carga de lodos	(SLR)	15 kg ST / m ²
3. Determinar el ciclo de deshidratación		
Tiempo del ciclo de deshidratación	(T)	10,00
Tiempo de ciclo calculado Ta> T	(Ta)	13
	Ta> T	Ok

4. Altura de la lamina de lodo	(H)	0,3 m
5. Área requerida		
Area requerida mediante productividad	(A)	120 m ²

En la tabla 21 se tiene la estimación de área de lechos de secado para la PTAR del municipio San Vicente de Ferrer, basada en Modelo de Cornwell & Vandermeijden, el resultado corresponde a 138 m².

Tabla 21. Estimación de área para San Vicente usando Modelo de Cornwell & Vandermeijden

Masa de solidos secos producidos Ms		2526 kg
Altura de los lodos despues de eliminar el agua libre	$H_f = (H_i) \left[\frac{S_i}{S_f dr} \right]$	
Cambio de altura en lodos causado por Evaporación	$\Delta H_e = (H_f) - \left[\frac{(H_f) (S_f dr)}{S_f} \right]$	
ΔH_e		0,11 m
Carga de solidos (Cornwell)	$L = (H_i)(S_i)(\rho)$	
L		18 kg / m ²
Área requerida	$A = \frac{M_s}{L} * F_s$	
A		138 m ²

4.3.5 Santo Domingo

En la Tabla 18 se muestra la estimación de área para los lechos de secado de la PTAR del municipio Santo Domingo usando las indicaciones del Artículo 211 de Res 0330 de 2017, con un resultado de 235 m².

Tabla 22. Estimación de área para Santo Domingo usando Art. 211 Res 0330/ 2017

Área requerida per capita	0,075 m ² / hab
Área requerida bajo Art 211 Res 0330	235 m ²

Así mismo, en la Tabla 23 se muestra la estimación de área teniendo como base el método de cargas superficiales de lodo, el resultado final corresponde a un área de 47 m², valor considerablemente inferior al mostrado en la tabla 22.

Tabla 23. Estimación de área para Santo Domingo usando cargas superficiales de lodo

1. Cantidad de lodo a deshidratar		
Carga volumetrica de lodo per capita UASB		15 g SS / hab*d
PPC de volumen de lodo UASB		0,4 L / hab*d
Flujo másico de lodo UASB	(M _S)	46.950 gr SS / d 47 kg SS / d
Flujo volumétrico de lodos UASB	(Q _S)	1.252 L / d 1 m ³ / d
2. Lodo producido en cada ciclo operacional		
Tiempo de secado	(T _d)	10 d
Tiempo de limpieza	(T _c)	5 d
Tiempo por ciclo	(T)	15 d
Volumen de lodo deshidratado por ciclo	(V _s)	18,78
3. Área requerida		
Carga de lodo	(SLR)	15 kg SS / d
Area requerida	(A)	47 m ²
Área requerida bajo cargas superficial de lodo		47 m ²

Luego, en la Tabla 24 se tiene la estimación de área para Santo Domingo usando la metodología de productividad, el resultado final es un area estimada de 118 m², área bastante superior a la estimada en la Tabla 23.

Tabla 24. Estimación de área para Santo Domingo usando la productividad

1. Cantidad de lodo a deshidratar		
Volumen de lodo fondo reactor		54,65 m ³
Volumen de lodo	(V _{lodos})	35,5225 m ³
Contenido inicial de solidos	(SC _i)	0,05
Densidad de lodos		1020 kg / m ³
Masa de lodos	(M _{lodos})	1812 kg
2. Establecer productividad acorde a clima y tipo de tratamiento biologico		
Productividad	(P)	1,65 kg ST / m ² * d
Tasa de carga de lodos	(SLR)	15 kg ST / m ²

3. Determinar el ciclo de deshidratación

Tiempo del ciclo de deshidratación	(T)	10,00
Tiempo de ciclo calculado $T_a > T$	(T_a)	10
	$T_a > T$	Ok

4. Altura de la lamina de lodo

Altura de la lamina de lodo	(H)	0,3 m
-----------------------------	-----	-------

5. Área requerida

Área requerida mediante productividad	(A)	118 m ²
---------------------------------------	-----	--------------------

Finalmente, en la Tabla 25 se tiene la estimación de área usando el Modelo de Cornwell & Vandermeijden, el resultado corresponde a 51 m².

Tabla 25. Estimación de área para Santo Domingo usando el Modelo de Cornwell & Vandermeijden

Masa de sólidos secos producidos M_s

		939 kg
--	--	--------

Altura de los lodos después de eliminar el agua libre

$$H_f = (H_i) \left[\frac{S_i}{S_f} \right]$$

H_f		0,14 m
-------	--	--------

Cambio de altura en lodos causado por Evaporación

$$\Delta H_e = (H_f) - \left[\frac{(H_f)(S_f)}{S_i} \right]$$

ΔH_e		0,11 m
--------------	--	--------

Carga de sólidos (Cornwell)

$$L = (H_i)(S_i)(\rho)$$

L		18 kg / m ²
---	--	------------------------

Área requerida

$$A = \frac{M_s}{L} * F_s$$

A		51 m ²
---	--	-------------------

5.4 Análisis de Áreas Estimadas con Áreas Construidas**4.4.1 La Piñuela**

Para realizar el estimado de las áreas expuestas se tuvo en cuenta una población proyectada al periodo de diseño de 798 habitantes, un caudal de diseño de 2 L/s, una concentración de SST en el afluente de 109.7 mg/L y un volumen del reactor UASB de 79.04 m³. En la Figura 17 se muestran los resultados de las áreas estimadas por la metodología indicada en la Res 0330

de 2017, cargas superficiales de lodo, productividad y el modelo de Cornwell & Vandermeijden, dichas áreas se comparan con las dimensiones de los lechos de secado construidos; allí se puede evidenciar que todas las estimaciones de área son superiores al área construida de lechos de secado. Asimismo, el área estimada usando las indicaciones del Artículo 211 Res. 0330 de 2017 es más de 3.2 veces que el área estimada por el método de cargas superficiales de lodo, 1.8 veces mayor que la estimada por el método de productividad, y 2.1 veces mayor al área estimada mediante el modelo de Cornwell & Vandermeijden, lo cual indica que este método no es el indicado en este caso, dado su implementación genera sobredimensionamientos.

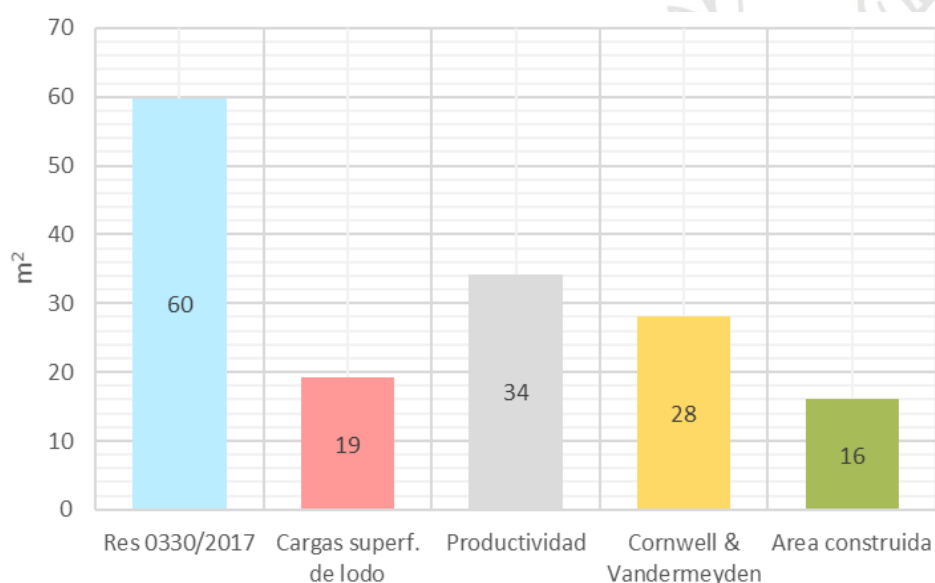


Figura 17. Comparación de áreas estimadas con área construida en La Piñuela

Con el propósito de analizar mejor los datos, se calculó el promedio de las áreas arrojadas por las metodologías de cargas superficiales de lodo, productividad y el modelo de Cornwell & Vandermeijden, con su límite inferior calculado como la desviación estándar menos el promedio, y el límite superior calculado como la desviación estándar más el promedio, tal como se observa en la Figura 18. Allí se puede observar que las áreas estimadas mediante la metodología de productividad y el modelo de Cornwell & Vandermeijden siguen una misma tendencia, además la metodología de cargas superficiales de lodo está por debajo del límite inferior calculado, de manera que para este caso se descarta el área estimada por la metodología de cargas superficiales de lodo.

En la Figura 18 se destaca que el área construida de lechos de secado en La Piñuela se encuentra por debajo del límite inferior de las áreas de lechos de

secado estimadas por las diferentes metodologías, lo cual indica que el área construida de lechos en esta PTAR no es adecuada para la dinámica de producción de lodos.

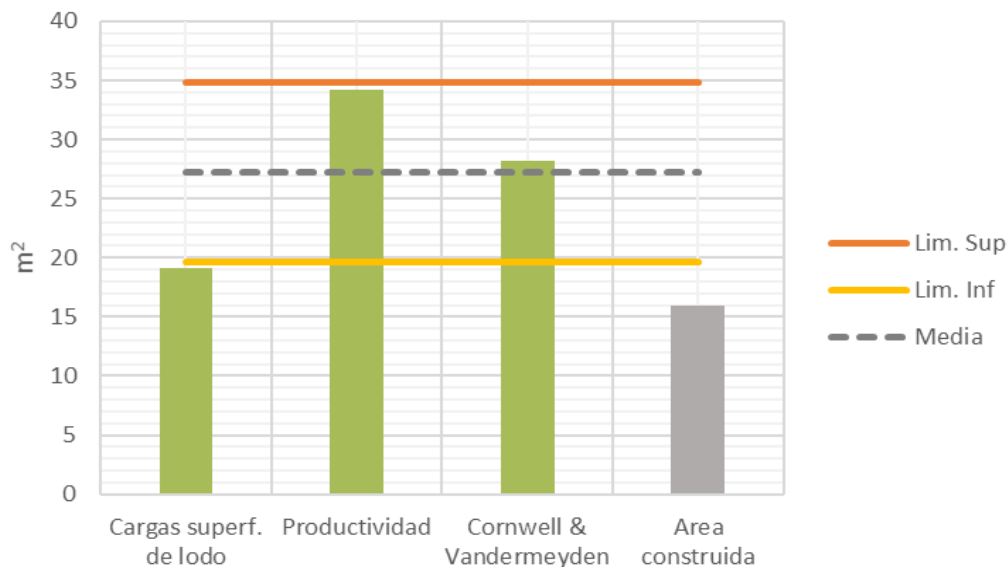


Figura 18. Análisis estadístico de áreas de lechos de secado PTAR La Piñuela

4.4.2 Granada

En el cálculo las áreas expuestas en la Figura 19 se tuvo en cuenta una población proyectada al periodo de diseño de 6440 habitantes, un caudal de diseño de 20 L/s, una concentración de SST en el afluente de 86.7 mg/L y el volumen del digestor de lodos correspondiente a 117 m³.

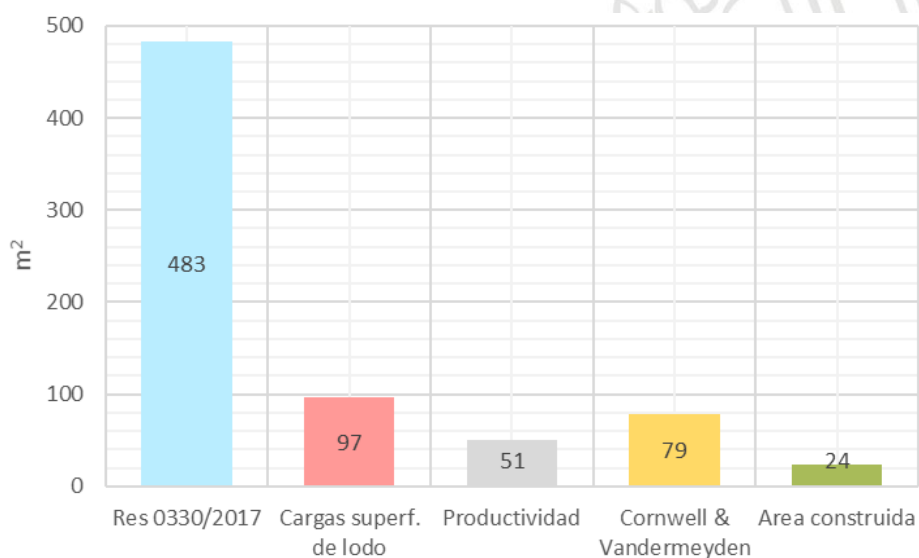


Figura 19. Comparación de áreas estimadas con área construida Granada

Al comparar los dimensionamientos realizados por las diferentes metodologías, se evidencia que el área estimada usando las indicaciones del Artículo 211 Res. 0330 de 2017 es superior a las áreas estimadas por la metodología de cargas superficiales, la de productividad y de Cornwell & Vandermeijden (más de 4.9 veces que el área estimada por el método de cargas superficiales de lodo, 9.5 veces mayor que la estimada por el método de productividad, y 6.1 mayor que la estimada por producción de lodos), lo cual nos indica de nuevo este método tiene un factor de seguridad muy grande.

Tal como se muestra en la Figura 20, se excluyó el área arrojada por la metodología que indica la Res 0330 de 2017, en vista de su gran factor de seguridad, y se calculó el promedio de las áreas arrojadas por las metodologías de cargas superficiales de lodo, productividad y el modelo de Cornwell & Vandermeijden, con los límites superior e inferior

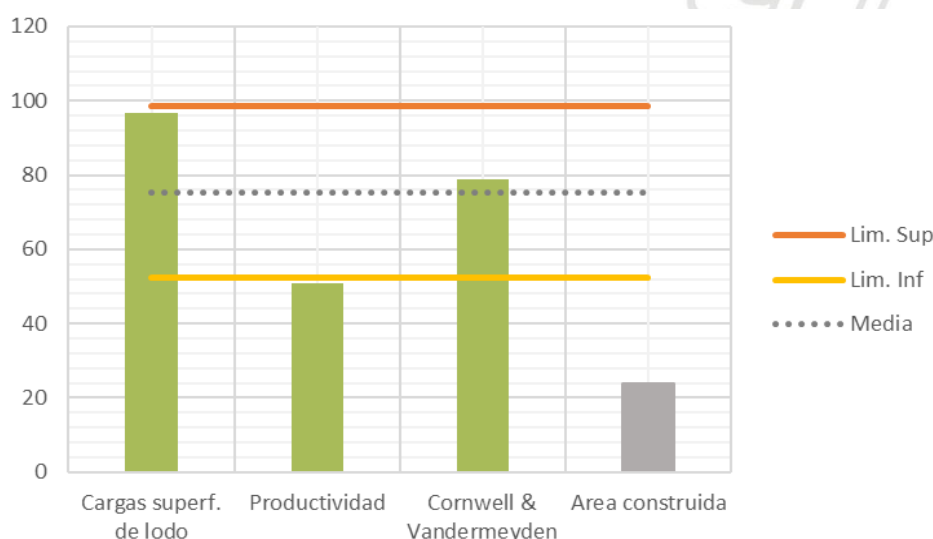


Figura 20. Análisis estadístico de áreas de lechos de secado PTAR Granada

En esta figura se puede observar que las áreas estimadas mediante la metodología de cargas superficiales de lodo y el modelo de Cornwell & Vandermeijden tienen una tendencia similar, también se tiene que el área estimada mediante la metodología de productividad está por debajo del límite inferior calculado, así que se descarta el área calculada por la metodología de productividad. Se tiene además que el área construida de lechos de secado es considerablemente inferior a las áreas estimadas, lo cual indica que el área construida no es la adecuada para las condiciones de la PTAR, esto se evidenció a la hora de operar la PTAR, dado que la

dinámica de evacuación y secado de lodos del digestor se ve limitada por la capacidad de los lechos de secado.

4.4.3 San Francisco

La estimación de las áreas de lechos de secado en San Francisco se realizó teniendo en cuenta una población proyectada al periodo de diseño de 1423 habitantes, un caudal de diseño de 5 L/s, una concentración de SST en el afluente de 106.6 mg/L y un volumen del reactor UASB de 77.74 m³.

Las estimaciones de área se realizaron con base en la metodología indicada en la Res 0330 de 2017, en cargas superficiales de lodo, en productividad y en el modelo de Cornwell & Vandermeijden, y se pueden evidenciar en la Figura 21. Allí se puede evidenciar que el área estimada mediante el Artículo 211 de la Res. 0330 de 2017 es más de 5.1 veces que el área estimada por el método de cargas superficiales de lodo, 3.1 veces mayor que la estimada por el método de productividad, y 4.7 mayor que la estimada por producción de lodos, lo cual reitera que usar esta metodología incide en sobredimensionamientos.

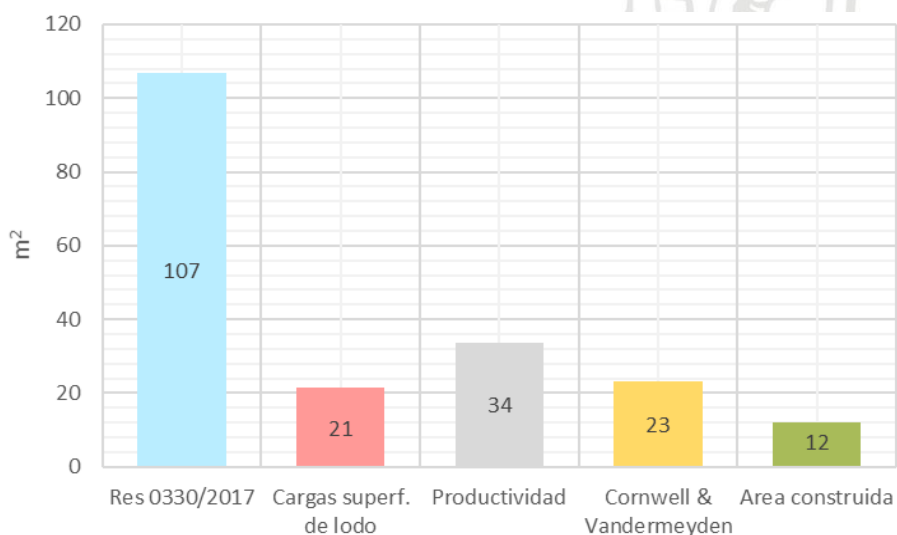


Figura 21. Comparación de áreas estimadas con área construida San Francisco

Igual que en los casos anteriores, para el análisis estadístico de áreas de lechos de secado se excluyó el área arrojada por la metodología que indica la Res 0330 de 2017, en vista de su gran factor de seguridad, y se calculó el promedio de las áreas arrojadas por las metodologías de cargas superficiales de lodo, productividad y el modelo de Cornwell & Vandermeijden, con los límites superior e inferior.

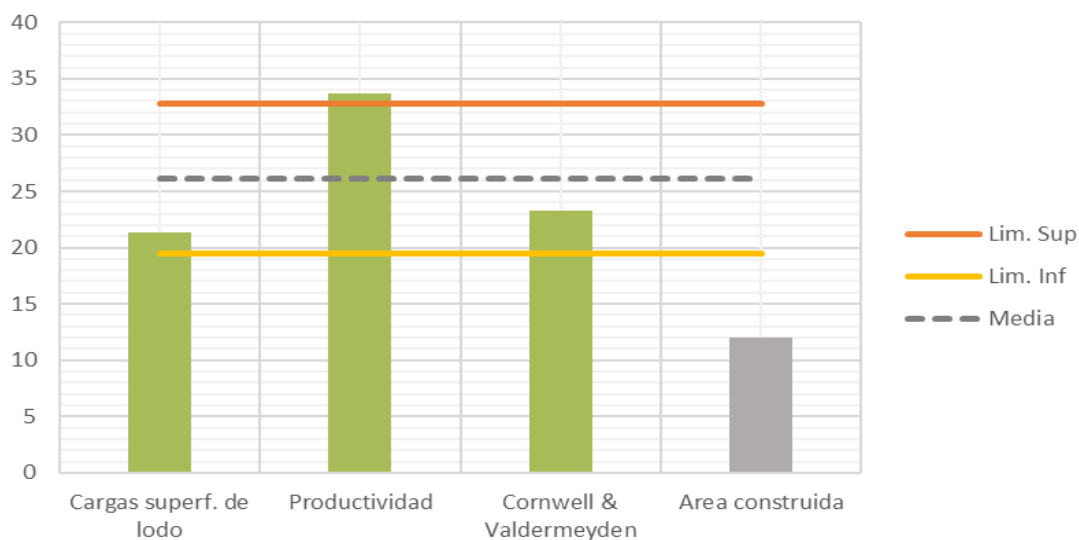


Figura 22. Análisis estadístico de áreas de lechos de secado PTAR San Francisco

Tal como se ilustra en la Figura 22, las áreas estimadas mediante cargas superficiales de lodo y el modelo de Cornwell & Vandermeyden tienen una tendencia similar, no obstante, el área estimada mediante la metodología de productividad está por encima del límite superior calculado, de manera que se descarta. Al comparar el área construida de lechos de secado con los límites de las áreas calculadas, se tiene que el área construida de lechos está por debajo del límite inferior, lo cual indica que los lechos no cuentan con las dimensiones suficientes para que la dinámica de evacuación y secado de lodos se lleve a cabo de manera óptima.

4.4.4 San Vicente Ferrer

Para calcular las áreas que se presentan en la Figura 23 se tuvo en cuenta una población proyectada al periodo de diseño de 12027 habitantes, un caudal de diseño de 36,81 L/s, una concentración de SST en el afluente de 186.5 mg/L y un volumen del reactor UASB de 277 m³.

Las metodologías usadas para estimar dichas áreas fueron la indicada en la Res 0330 de 2017, cargas superficiales de lodo, productividad y el modelo de Cornwell & Vandermeyden; las áreas arrojadas estas metodologías se comparan con las áreas de los lechos de secado construidos para verificar sobredimensionamientos o subdimensionamiento. Como se puede evidenciar en la Figura 23 el área estimada mediante el Artículo 211 de la Res. 0330 de 2017 es más de 5 veces superior al área estimada por cualquiera de los otros tres métodos. Asimismo, las dimensiones de los lechos de secado construidos están por encima de las dimensiones estimadas

mediante las metodologías de productividad y el modelo de Cornwell & Vandermeijden.

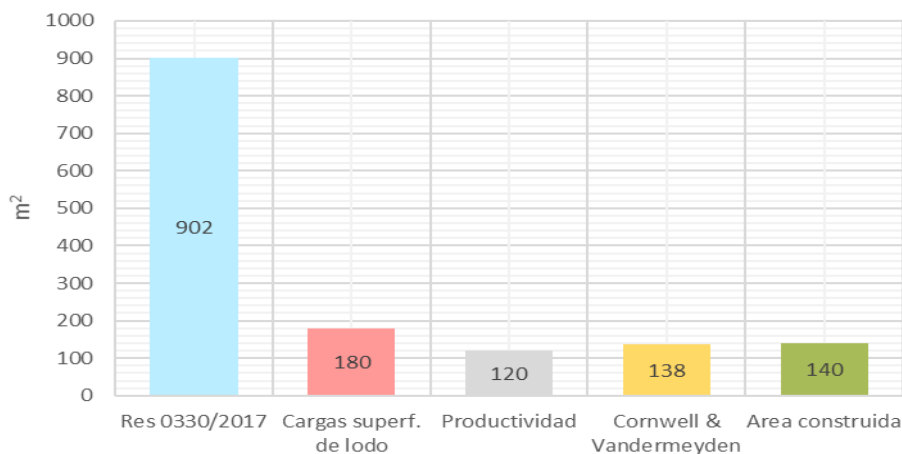


Figura 23. Comparación de áreas estimadas con área construida San Vicente Ferrer

Para analizar mejor los datos se realizó un breve análisis estadístico de las áreas de los lechos de secado, el análisis consistió en el cálculo del promedio de las áreas estimadas por las metodologías de cargas superficiales de lodo, productividad y el modelo de Cornwell & Vandermeijden, con su límite inferior calculado como la desviación estándar menos el promedio y el límite superior calculado como la desviación estándar más el promedio, y se compararon con el área de lechos de secado construidas.

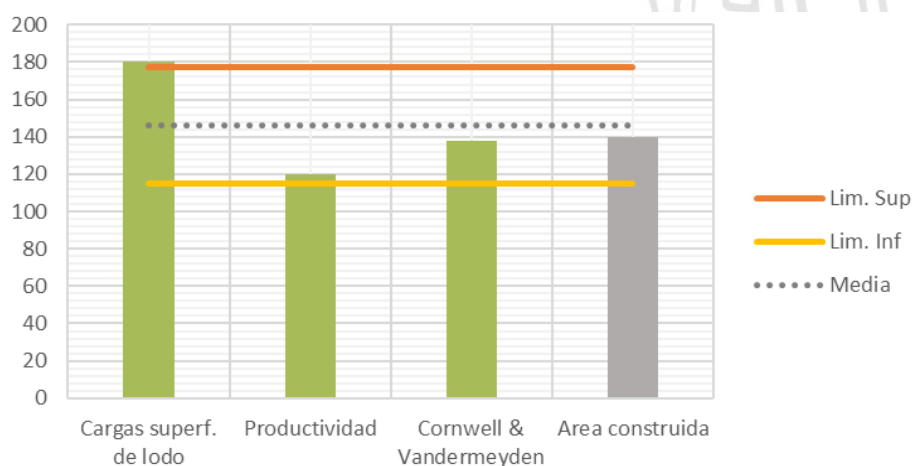


Figura 24. Análisis estadístico de áreas de lechos de secado PTAR San Vicente Ferrer

Se tiene que las áreas estimadas mediante productividad y el modelo de Cornwell & Vandermeijden siguen una misma tendencia, mientras que el área estimada mediante el método de cargas superficiales de lodo se halla por encima del límite superior, por lo que se descarta esta área. Por otro lado, se tiene que el área construida de lechos de secado está entre el límite

inferior y la media, de manera que el área construida es la adecuada para las condiciones de la PTAR.

4.4.5 Santo Domingo

En el cálculo las áreas presentadas en la Figura 25 se tuvo presente una población proyectada al periodo de diseño de 3130 habitantes, un caudal de diseño de 11.55 L/s, una concentración de SST en el afluente de 95.2 mg/L y el volumen del reactor UASB de 273 m³, y emplearon las indicaciones de la Res 0330 de 2017, la metodología de cargas superficiales de lodo, la metodología de productividad y el modelo de Cornwell & Vandermeijden.

Como se observa en la Figura 25, el área calculada por la metodología indicada por la Res 0330 de 2017 es de al menos 2 veces el área calculada por las otras metodologías, lo cual indica que emplear este método lleva a sobredimensionar los lechos de secado, dado su alto factor de seguridad con respecto a las otras metodologías.

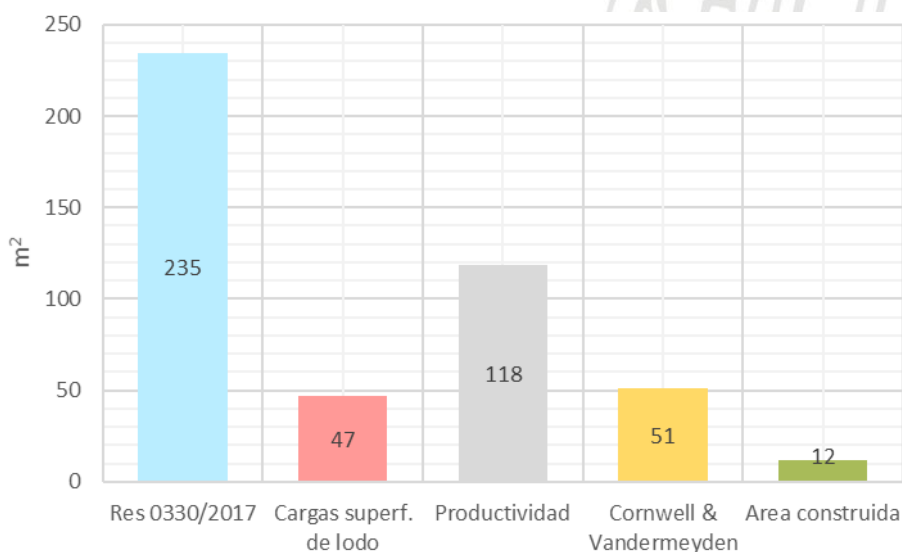


Figura 25. Comparación de áreas estimadas con área construida Santo Domingo

Por otro lado, en la Figura 26 se tiene el análisis estadístico realizado para las áreas estimadas de lechos de secado, allí se excluyó el área estimada mediante la metodología que indica la Res 0330 de 2017, en vista de su gran factor de seguridad, y se calculó el promedio de las áreas arrojadas por las metodologías de cargas superficiales de lodo, productividad y el modelo de Cornwell & Vandermeijden, con los límites superior e inferior.

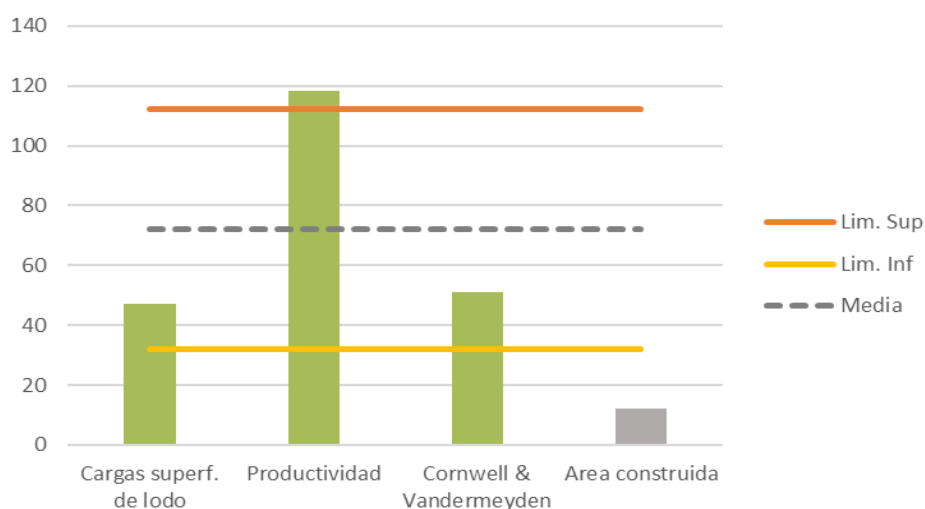


Figura 26. Análisis estadístico de áreas de lechos de secado PTAR Santo Domingo

Al comparar las dimensiones de los lechos construidos con las estimadas se tiene que el área de lechos de secado construidos no representa ni la mitad de las dimensiones estimadas por cualquiera de las metodologías usadas, esto indica que los lechos de esta PTAR se encuentran subdimensionados. Las áreas estimadas mediante cargas superficiales de lodo y el modelo de Cornwell & Vandermeijden tienen una tendencia muy similar, no obstante, el área estimada mediante la metodología de productividad está por encima del límite superior calculado, esto puede deberse a que en dicha metodología un valor decisivo es el porcentaje de lodos en el reactor UASB, y al no tener medios para realizar el perfil de lodos para estimar el volumen de lodos real, se asumió dicho valor como un 20% del volumen del UASB, de modo que se descarta, y se recomienda como área de secado el promedio de las alternativas de carga superficial de lodos y Cornwell & Vandermeijden, que corresponde al valor de 49.1 m².

5.5 Análisis de Art. 211 de Res. 0330 de 2017

El Art. 211 de Res. 0330 de 2017 establece que para lodos primarios digeridos el valor del área per cápita es de 0.1 m², con una carga de sólidos que oscila entre 120 - 150 kg ST/ m² *año, al dividir el extremo superior de carga de sólidos secos anual planteada entre 365 días que tiene un año, se obtiene un valor de productividad correspondiente a 0.41 kg ST/m² *d. Sin embargo, el valor de productividad para lechos de secado planteado por van Haandel & van der Lubbe es de 1.65 kg ST/m²*d para regiones tropicales y 0.55 kg ST/m²*d para regiones templadas, es decir el valor de productividad para climas tropicales es 3 veces el valor para climas templados y la Res. 0330 de 2017 toma un valor cercano al planteado para regiones templadas. Al

observar la Tabla 4, se comprende que la Res. 0330 de 2017 adoptó lo sugerido por Metcalf & Eddy para regiones templadas erradamente, pues Colombia es un país de clima tropical, eso lleva a pensar que el área requerida per cápita sería la tercera parte del área requerida en climas templados, es decir 0.03 m^2 /per cápita.

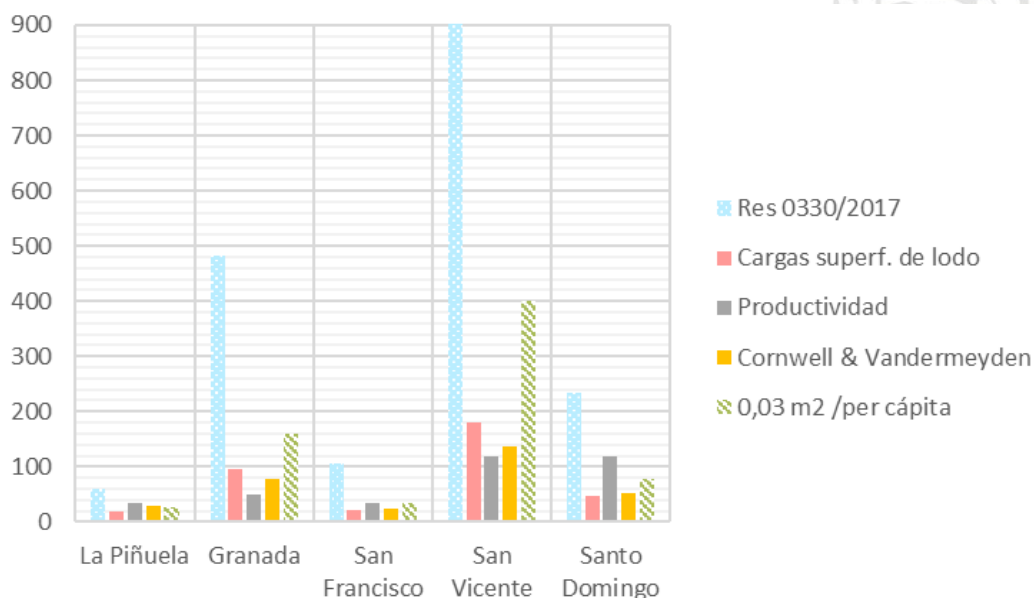


Figura 27. Consolidado de áreas estimadas.

A fin de constatar lo anterior, se incluyó una estimación de área teniendo en cuenta el valor de 0.03 m^2 per capita, tal como se muestra en la Figura 27 y se comparo con lo establecido en el Artículo 211 de Res 0330 de 2017, la metodología basada en cargas superficiales de lodo, la metodología basada en productividad y el modelo de Cornwell & Vandermeijden.

Al analizar las áreas estimadas se evidencia que para el corregimiento La Piñuela y el municipio San Francisco, la estimación de área con el valor de 0.03 m^2 per capita, tiene una misma tendencia con las metodologías de cargas superficiales de lodo, productividad y el modelo de Cornwell & Vandermeijden, sin embargo, en el caso de los municipios de Granada, San Vicente y Santo Domingo, que tienen poblaciones proyectadas superiores a 3000 habitantes, aplicar el valor de 0.03 m^2 per capita tiende a sobredimensionar con respecto a las metodologías analizadas.

5.6 Soluciones

- ✓ Exceptuando la PTAR de San Vicente, las PTAR evaluadas no cumplen con el área mínima de lechos de secado.
- ✓ En vista de la capacidad limitada que tienen los lechos de secado de La piñuela, se sugiere que cuando inicien las purgas de lodo se busque otra alternativa para el material procedente del canal de entrada. Sin embargo, en un futuro cercano es importante que se aumente el área útil de los lechos a 31 m² dado que el área superficial actualmente construida no es suficiente.
- ✓ En vista de que actualmente en la PTAR de Granada se cuenta con solo 24 m² de lechos de secado cuando en realidad se requieren 75 m², la dinámica de evacuación de lodos por parte del digestor se ve bastante limitada, de modo que se sugiere realizar ampliaciones a los lechos en cuanto antes.
- ✓ Para la PTAR del municipio de San Francisco se recomienda aumentar el área útil de lechos de secado a 22 m².
- ✓ Para la PTAR del municipio de Santo Domingo se recomienda aumentar el área útil de lechos de secado a 49 m².
- ✓ Para evitar el ingreso de agua lluvia en el proceso de deshidratación de lodos, se recomienda instalar una cubierta adecuada sobre los lechos de secado.
- ✓ A fin de aumentar la eficiencia de secado en los lechos, se recomienda hacer un rayado a la superficie del lodo, puesto que en la superficie del lodo se genera una costra que dificulta la evaporación del agua de las capas inferiores a la atmósfera.

6. CONCLUSIONES

- ✓ Las áreas de los lechos de secado construidos en las PTAR La Piñuela, Granada, San Francisco y Santo Domingo están por debajo de las áreas calculadas por diferentes métodos, de manera que se encuentran subdimensionados y requieren ampliaciones para que la dinámica de evacuación y secado de lodos no sacrifique los rendimientos de dichas PTAR.
- ✓ Para realizar el dimensionamiento de los lechos de secado se recomienda analizar diferentes alternativas, de modo que se ajusten a las condiciones de cada PTAR.
- ✓ Las áreas de lechos de secado calculadas mediante las indicaciones del Art. 211 de la Res. 0330 de 2017 dan como resultado un sobredimensionamiento respecto a los resultados obtenidos por los otros métodos. La normatividad del reglamento del sector de agua potable y saneamiento básico –RAS– debería tener en su contenido, metodologías adecuadas a las condiciones climáticas del país que sirvan de guía para el diseño de los lechos de secado. Así pues, sin unas bases normativas claras se incurre no sólo en errores de diseño y constructivos, sino también problemas operativos y de rendimiento en las PTAR.
- ✓ El Art. 211 de la Res. 0330 de 2017 está adoptando un valor por habitante correspondiente a un país de clima templado, tomando como base la recomendación de Metcalf Eddy. Para lodos procedentes de reactores UASB o similares, lo lógico sería tomar como base la recomendación de van Haandel y van der Lubbe, que corresponde a un país tropical y cuyo valor es de $1.65 \text{ kg ST/m}^2 \cdot \text{d}$

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alice Outwater, B. T. (1994). *Reuse of Sludge and Minor Wastewater Residuals* (1er editio). Lewis Publishers. <https://books.google.com.co/books?id=m1LzDwAAQBAJ&hl=es&lr=>
- Alvarez, J., Lopez, G., Amutio, M., Bilbao, J., & Olazar, M. (2016). Preparation of adsorbents from sewage sludge pyrolytic char by carbon dioxide activation. *Process Safety and Environmental Protection*, 103, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.035>
- Amuda, O. S., Deng, A., Alade, A. O., & Hung, Y.-T. (2008). *Conversion of Sewage Sludge to Biosolids BT - Biosolids Engineering and Management* (L. K. Wang, N. K. Shammam, & Y.-T. Hung (eds.); pp. 65–119). Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-59745-174-1_2
- Andreoli, Cleveron Vitorio; Sperling, Marcos von; Fernandes, F. (2007). Sludge Treatment and Disposal. En *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions* (Vol. 6, p. 244). IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780402734>
- Bassan, M., Brdjanovic, D., Dangol, B., Dodane, P.-H., & Hooijmans, C. M. (2014). *Faecal Sludge Management Systems Approach for Implementation and Operation* (L. Strande, M. Ronteltap, & D. Brdjanovic (eds.); 1a ed.). IWA. https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/EWM/Book/FSM_Ch0_Table_of_Contents.pdf
- Brisolara, K. B., Gentile, B., Puszykowski, K., & Bourgeois, J. (2020). Residuals, sludge, and biosolids: Advancements in the field. *Water Environment Research*, 92(10), 1541–1551. <https://doi.org/10.1002/wer.1402>
- Campbell, H. W. (2000). Sludge management – future issues and trends. *Water Science and Technology*, 41(8), 1–8. <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/41/8/1/8798/Sludge-management-future-issues-and-trends?redirectedFrom=fulltext>
- Chen, G., Yue, P. L., & Mujumdar, A. S. (2002). Sludge dewatering and drying. *Drying Technology*, 20(4–5), 883–916. <https://doi.org/10.1081/DRT-120003768>
- Cornare, & Alcaldía San Vicente de Ferrer. (2020). *Referentes ambientales para la contrucción de los planes de desarrollo en los municipios de la jurisdiccion de Cornare*. https://www.cornare.gov.co/SIAR/REFERENTES_AMBIENTALES/2019-2023/SAN_VICENTE.pdf
- Cornwell, D. A., & Vandermeiden, C. (1999). Sizing residuals drying beds. *Journal AWWA*, 91(11), 94–105. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1999.tb08737.x>
- Dáguer G, G. P. (2003). Gestión de biosólidos en Colombia. *ACODAL*, 202. <https://www.acodal.org.co/acodal-pdf/revista>
- Dodane, P. H., & Ronteltap, M. (2014). Lechos de Secado sin Plantas. *Manejo*

- de lodos fecales, *Capítulo 7*, 139–151. http://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/EWM/FSM_Libro_low_res/manejo_fsm_cap7_120ppi.pdf
- Foladori, P., Andreottola, G., & Ziglio, G. (2013). *Sludge Reduction Technologies in Wastewater Treatment Plants*. IWA Publishing. <http://aplicacionesbiblioteca.udea.edu.co:2259/ehost/detail/detail?vid=0&sid=0327f910-3cde-4c3d-b067-db4345dedc83%40sessionmgr4007&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#AN=690469&db=nlebk>
- Fuentes Valdemar, G. (2011). *Estudios de optimización y construcción del sistema de aguas residuales del municipio de San Francisco, Antioquia*. <https://cutt.ly/bnprnG9L>
- He, J., Chen, Z., Dougherty, M., Hu, S., & Zuo, X. (2021). Explore the sludge stabilization process in sludge drying bed by modeling study from mesocosm experiments. *Environmental Research*, 195, 110837. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110837>
- Heinss, U., Larmie, S. A., & Strauss, M. (1998). Solids Separation and Pond Systems for the Treatment of Faecal Sludges in the Tropics. *EAWAG/SANDEC- Water and Sanitation in Developing Countries*, 5(2), 88.
- Lawrence K. Wang, Nazih K. Shammas, & Yung-Tse Hung. (2007). Drying Beds. En L. K. Wang, Nazih K. Shammas, & Yung-Tse Hung (Eds.), *Biosolids Treatment Processes* (1a ed., pp. 403–430). Humana Press. <https://doi.org/10.1007/978-1-59259-996-7>
- Lin, S. D. (2014). Wastewater Engineering. En *Water and Wastewater Calculations Manual* (Third Edit). McGraw-Hill Education. www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071819817
- Macías Ospina, A. L., Londoño Vélez, S., & Molina Pérez, F. (2021). *Informe diagnóstico PTAR Granada*.
- Mackenzie L. Davis P.E., BCEE, P. D. (2019). Management of Sludges. En *Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice* (2nd editio). McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260132274/toc-chapter/chapter15/section/section25>
- McFarland, M. J. (2001). *Biosolids and Sludge Processing*. McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780070471788/chapter/chapter3>
- Mesa Ariza, L. V., Londoño Vélez, S., & Molina Pérez, F. (2020). *Informe de Diagnóstico, PTAR "La tripa 2"* (p. 14). https://n9.cl/san_francisco
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización* (G. Tchobanoglous (ed.); Tercera ed). McGraw-Hill.
- Decreto 1287 de 2014, 15 (2014). <http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Decretos/1259502>
- Orozco Jaramillo, A. (2005). *Bioingeniería de aguas residuales* (2a ed.). ACODAL.
- Ortega de Miguel Yasmína Ferrer Medina Juan José Salas Rodríguez Carlos

- Aragón Cruz Álvaro Real Jiménez, E. (2010). *Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones* (1ª ed). Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. <https://editorial.tirant.com/es/libro/manual-para-la-implantacion-de-sistemas-de-depuracion-en-pequenas-poblacione-9788449110719>
- Pescod, M. B. (1971). Sludge Handling and Disposal in Tropical Developing Countries. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 43(4), 555–570. <http://www.jstor.org/stable/25037355>
- Pidre, J., Salas, J., & Cuenca, I. (2007). *Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales: Generalidades*. Centro de las nuevas tecnologías del agua (CENTA).
- Ramirez, M. L., Londoño Vélez, S., & Molina Pérez, F. (2021). *Informe de Diagnóstico, PTAR La Piñuela*. <https://cutt.ly/4naJqfq>
- Rojas Londoño, C., Vargas Sampedro, J., & Rodríguez Loaiza, D. (2020). *Informe de diagnóstico PTAR Santo Domingo*. http://bit.do/Santo_Domingo
- Salgado Martínez, J., Vargas Sampedro, J., & Rodríguez Loaiza, D. (2021). *Manual de operacion y mantenimineto PTAR San Vicente de Ferrer* (p. 32). <https://cutt.ly/unpGfrF>
- Sette Ramalho, R., & Jimenez, D. (1996). Introduction to Wastewater Treatment Prosses. En D. Jiménez Beltrán, F. Lora, & R. Sette Ramalho (Eds.), *Tratamiento de aguas residuales* (2a ed., p. 707). Reverté. https://books.google.com.pe/books?id=30etGjzPXyWC&printsec=copyriht&hl=es&source=gbs_pub_info_r#v=onepage&q&f=false
- van Haandel, A., & van der Lubbe, J. (Eds.). (2019). Dewatering, Dehydration and drying of sludge. En *Anaerobic Sewage Treatment: Optimization of Process and Physical Design of Anaerobic and Complementary Processes* (p. 0). IWA Publishing. https://doi.org/10.2166/9781780409627_0257
- Villaseñor Gándara, G. (1995). *Tratamiento y disposición de lodos producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales* [Universidad de Sonora]. <http://www.bidi.uson.mx/TesisIndice.aspx?tesis=4314>
- Wang, L. K., Li, Y., Shammas, N. K., & Sakellaropoulos, G. P. (2007). Drying Beds. En L. K. Wang, N. K. Shammas, & Y.-T. Hung (Eds.), *Biosolids Treatment Processes* (pp. 403–430). Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-59259-996-7_13
- WEF. (2018). *Drying Beds and Lagoons* (6th editio). McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260031188/toc-chapter/chapter22/section/section115>

8. Anexos

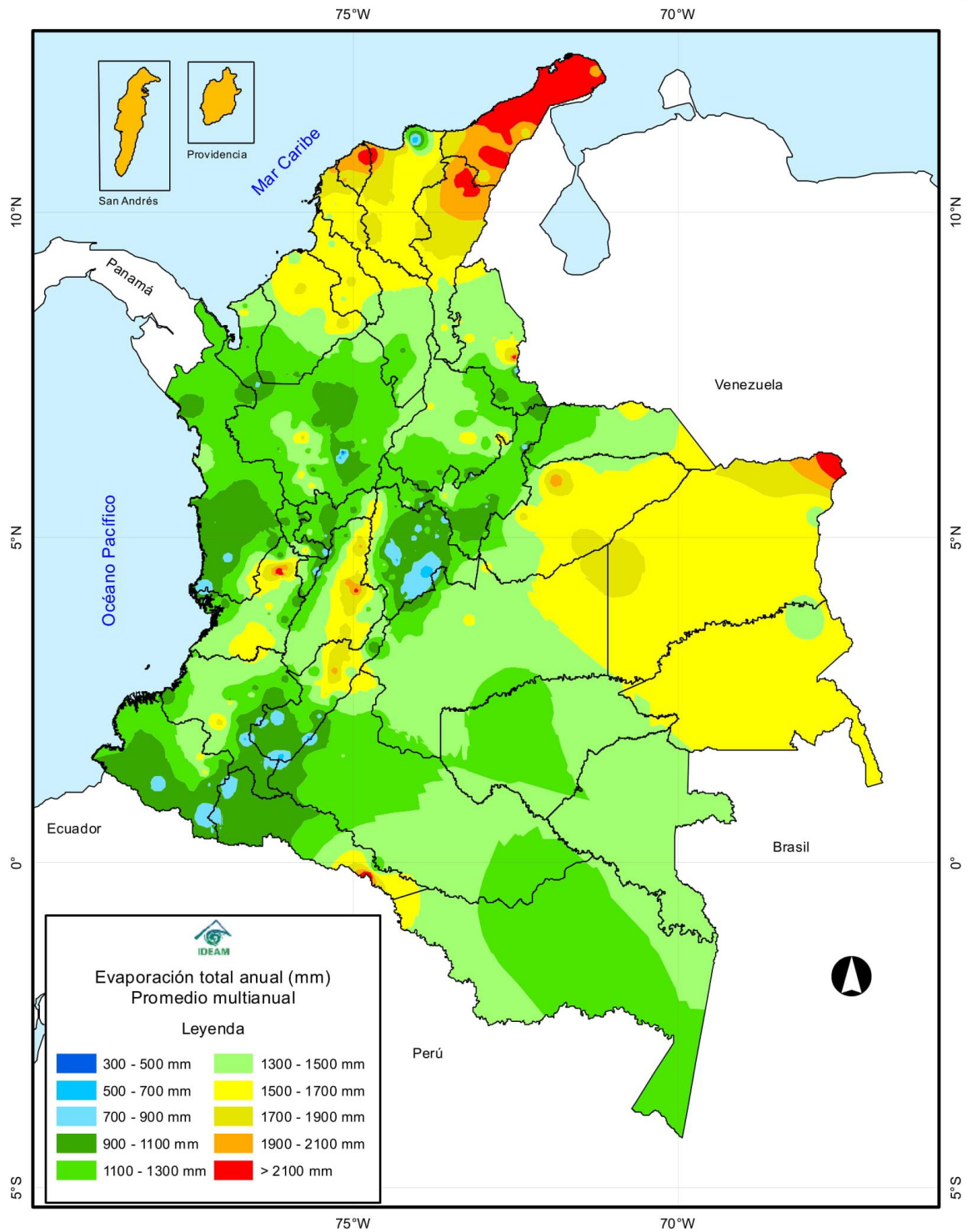


Figura 28. Mapa de Evaporación Promedio Anual
Tomado de Atlas climatológico del [IDEAM](#)



Figura 29. Localización de PTAR Granada



Figura 30. Localización de PTAR San Francisco



Figura 31. Localización de PTAR del municipio de Santo Domingo



Figura 32. Ubicación PTAR La Piñuela
Tomado de: Ramirez, (2021)



Figura 33. Localización de PTAR del municipio de San Vicente Ferrer

