

Asesoramiento técnico en digestión anaerobia en el sector lácteo

UNIDO Purchase Order AMENDMENT, P.O. 3000036493, Amendment No. 1, Project No 120323

ENTREGABLE 3 - INFORME FINAL

Evaluación operativa de separadores de sólidos para efluentes de tambo

(Versión final revisada)



ÍNDICE

	Página
1. OBJETIVO DEL ASESORAMIENTO Y ACTIVIDADES	4
2. INTRODUCCIÓN Y MARCO GENERAL	4
3. METODOLOGÍA.....	8
3.1. SELECCIÓN DE CASOS ESTUDIADOS	8
3.1.1. <i>Caso 1: Estercolero</i>	<i>10</i>
3.1.2. <i>Caso 2: Prensa extrusora de eje inclinado 1</i>	<i>11</i>
3.1.3. <i>Caso 3: Prensa extrusora de eje inclinado 2</i>	<i>13</i>
3.1.4. <i>Caso 4: Prensa extrusora de eje horizontal.....</i>	<i>15</i>
3.1.5. <i>Caso 5: Tamiz o "pantalla"</i>	<i>16</i>
3.2. MUESTREO Y MEDICIONES EN CAMPO	18
3.3. ANÁLISIS DE LABORATORIO.....	18
3.3.1. <i>Fraccionamiento por tamaño.....</i>	<i>19</i>
4. RESULTADOS	21
4.1. CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE BRUTO	21
4.2. EFICIENCIAS DE SEPARACIÓN DE SÓLIDOS	22
4.2.1. <i>Caso 1 - Estercolero</i>	<i>23</i>
4.2.2. <i>Caso 2 – Prensa extrusora de eje inclinado 1</i>	<i>26</i>
4.2.3. <i>Caso 3 – Prensa extrusora de eje inclinado 2</i>	<i>27</i>
4.2.4. <i>Caso 4 - Prensa extrusora de eje horizontal.....</i>	<i>28</i>
4.2.5. <i>Caso 5 - Tamiz.....</i>	<i>29</i>
4.3. COMPARACIÓN DE CASOS	31
4.3.1. <i>Distribución de tamaños de partícula de los Sólidos Suspendidos.....</i>	<i>34</i>
4.3.2. <i>Eficiencias de remoción según tamaño de sólidos</i>	<i>35</i>
4.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES SÓLIDOS SEPARADOS EN LOS EQUIPOS	37
4.5. COSTOS OPERATIVOS.....	41
5. CONCLUSIONES	43
6. BIBLIOGRAFÍA.....	44
7. AGRADECIMIENTOS	44

Informe elaborado por la Consultora PRAXIS LAB S.R.L. en el marco del Asesoramiento Técnico en Digestión Anaerobia en el sector Lácteo, para el Proyecto BIOVALOR - “Hacia una economía verde en Uruguay: estimulando prácticas de producción sostenibles y tecnologías con bajas emisiones en los sectores priorizados”.

Las instituciones que forman parte del proyecto BIOVALOR son:

- el organismo nacional de ejecución, Ministerio de Industria, Energía y Minería a través de la Dirección Nacional de Energía (MIEM-DNE);
- el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente a través de la Dirección Nacional de Medio Ambiente (MVOTMA-DINAMA);
- el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP);
- la agencia implementadora, Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI).

Los autores del presente documento son:

Ing. Quím. (M.Sc.) Alberto Hernández

Ing. Quím. (M.Sc.) Alejandra Benítez

Lic. Quím. Inés Portillo

Bach. Lucía Verdier

1. Objetivo del asesoramiento y actividades

Según lo establecido en los Términos de Referencia, el objetivo de la consultoría es realizar evaluación de rendimientos y eficiencias de distintos equipos de separación de sólidos para tambos en las condiciones de producción nacional.

Las actividades necesarias para la realización de este objetivo incluyen:

Actividad 1.1: Seleccionar, visitar y definir las instalaciones donde se realizarán los muestreos.

Actividad 1.2: Coordinar con la UGP y los productores para organizar las tomas de muestras en los distintos establecimientos. Se propone evaluar hasta 6 tipos de sistemas de separación de sólidos (un estercolero y 5 separadores mecánicos).

Actividad 1.3: Ejecutar la toma de muestras en cada establecimiento. Relevar datos generales del establecimiento (cantidad de VO, consumo de agua, tipo de alimentación, tiempo de ordeño, cantidad de órganos en la sala de ordeño), así como caudal de alimentación de líquido a los separadores y consumo de energía eléctrica, cuando corresponda.

Actividad 1.4: Realizar los análisis correspondientes para cada tipo de sistema de separación, (fases líquidas y sólida).

En el presente informe se reportan los resultados de la evaluación operativa de separadores de sólidos actualmente en uso en tambos uruguayos, aplicando una metodología de “estudio de casos”. En esta Versión Final Revisada se recogen los comentarios, correcciones y sugerencias surgidas como resultado de la revisión por los técnicos de Biovalor, así como los aportes recibidos durante las instancias de difusión pública de los resultados (reuniones virtuales vía plataforma Zoom de fechas 22/04/2020 y 12/05/2020).

2. Introducción y marco general

En Uruguay la gestión de los residuos líquidos de los tambos se ha realizado tradicionalmente desde una óptica de “tratamiento de efluentes”, por medio de sistemas lagunares pasivos, combinando lagunas anaerobias y facultativas, con vertido de efluente hacia los cursos de agua (Figura 1). El objetivo de estos sistemas de tratamiento era la remoción de Materia Orgánica (expresada habitualmente como DBO₅ o DQO) y de Sólidos Suspendidos.

La visión de la gestión ambiental del sector lechero se modificó en los últimos años, especialmente a partir de 2013, ante el deterioro constatado en la calidad del agua en la cuenca del río Santa Lucía (coincidentalmente una de las zonas con mayor concentración territorial de tambos del país) por aporte de macronutrientes (Nitrógeno y especialmente, Fósforo), que incrementaron los riesgos de eutrofización y crecimiento de cianobacterias. Esto llevó, por una parte, a establecer nuevas reglamentaciones ambientales que enmarcaron la gestión de efluentes y residuos sólidos de diversas fuentes que aportan a la cuenca del río Santa Lucía, entre las que se encuentran los tambos.

Por otra parte, se modificó el paradigma imperante sobre el manejo de los residuos de los tambos, que pasó de la visión tradicional de “tratamiento” a la “gestión y reciclaje”. Actualmente existe un consenso técnico a nivel nacional en cuanto a la conveniencia de gestionar los residuos orgánicos de los tambos mediante su aplicación al terreno, reciclando macronutrientes (nitrógeno y fósforo) dentro de los predios lecheros, y evitando su descarga a los cursos de agua. El sistema de gestión propuesto de “Circularidad de nutrientes” se esquematiza en la Figura 2.

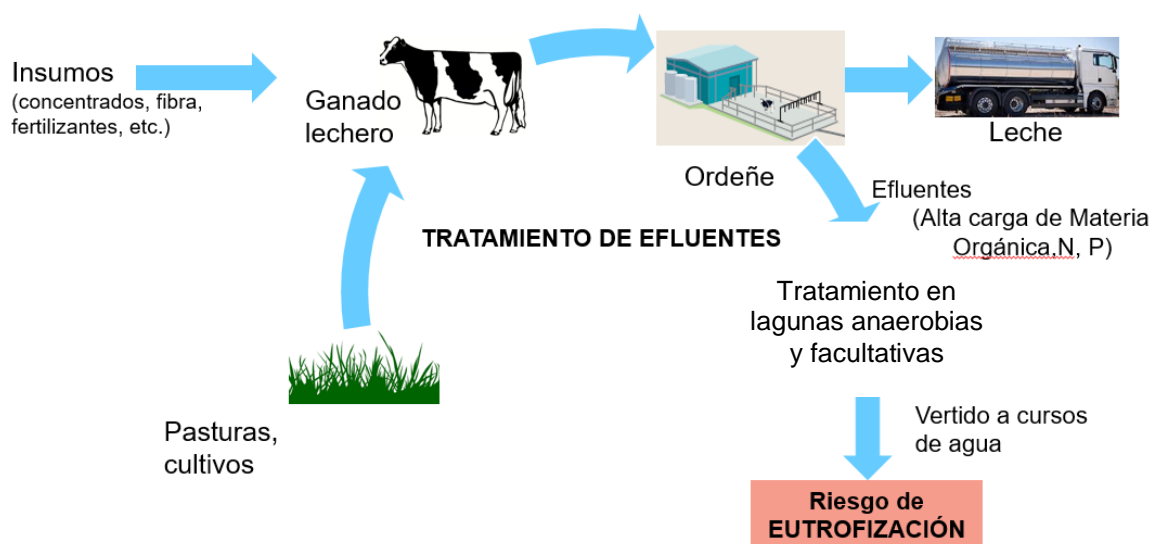


Figura 1. Sistema de tratamiento de efluentes con vertido de nutrientes

En particular, desde el Proyecto BIOVALOR se ha impulsado esa forma de gestión, basada en premisas de la economía circular. BIOVALOR es un proyecto del gobierno uruguayo articulado por MIEM, MVOTMA y MGAP, con ONUDI como unidad ejecutora, y cofinanciado por GEF, cuyo objetivo principal es la transformación de residuos generados a partir de actividades agropecuarias, agroindustriales y de pequeños centros poblados, convirtiéndolos en energía y/o subproductos, con el fin de desarrollar un modelo sostenible de bajas emisiones (contribuyendo a la reducción de Gases de Efecto Invernadero), a través del desarrollo y transferencia de tecnologías adecuadas.

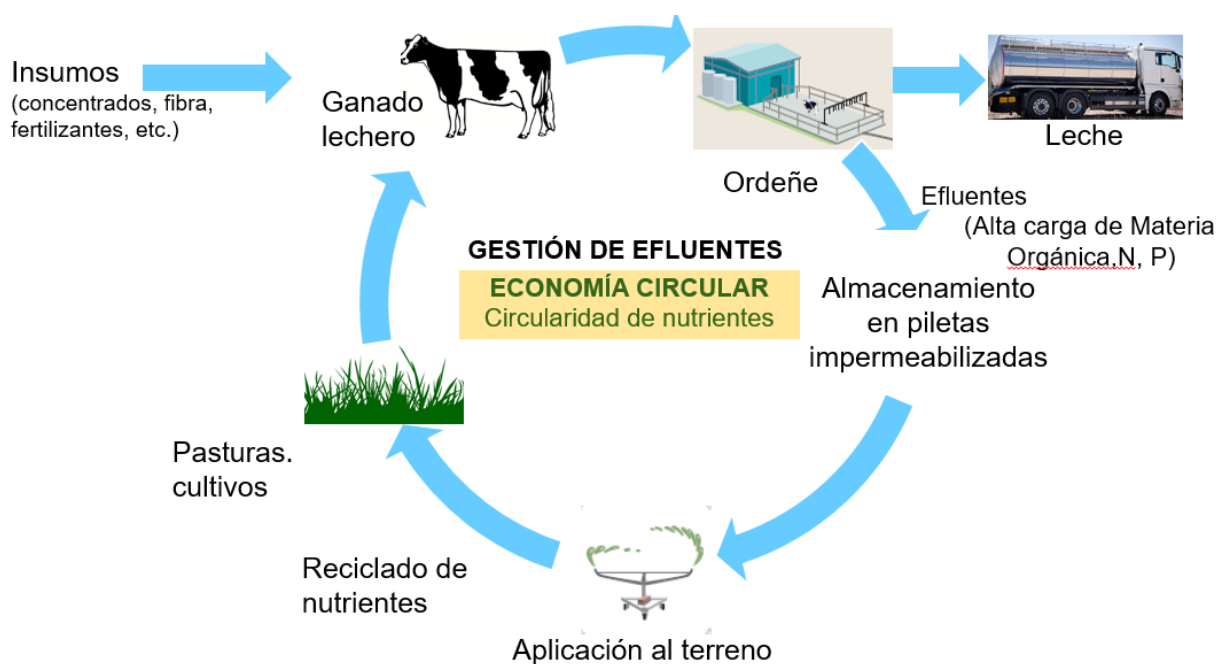


Figura 2. Sistema de gestión de efluentes con reciclado de nutrientes

En este modelo de economía circular, se destina el efluente del tambo a su aplicación al terreno mediante sistemas de irrigación de distintos tipos, reciclando Nitrógeno, Fósforo y Potasio. Por este motivo es necesario minimizar la presencia de sólidos en suspensión en el efluente a aplicar, como forma de prevenir obstrucciones y taponamientos de tuberías y toberas de los aspersores.

Además, si el efluente se aplica al suelo con criterios agronómicos de fertilización, se requiere contar con lagunas o piletas impermeabilizadas, que permitan acumularlo hasta el momento apropiado para su aplicación (fase del cultivo, condición de suelo no saturado, etc.). En este sentido, es conveniente que el efluente a acumular en las piletas contenga la menor cantidad posible de sólidos sedimentables, con el fin de evitar una pronta colmatación de las piletas. Debe tenerse en cuenta que la tarea de limpieza y extracción de sólidos sedimentados en las lagunas, es una operación engorrosa, y que incrementa los costos operativos del tambo. Este es otro motivo que lleva a minimizar la presencia de sólidos en el efluente de los tambos.

Se recurre entonces a etapas previas de separación de los sólidos en suspensión, con la doble finalidad mencionada (evitar obstrucciones en los sistemas de aplicación mediante bombeo y aspersión, y evitar la colmatación de las lagunas). De esta manera se agrega una etapa más al sistema de gestión de efluentes, y se genera una (nueva) corriente de residuos sólidos a gestionar, resultando el esquema operativo presentado en la Figura 3. El destino de esos sólidos separados es también la aplicación al terreno, buscando aprovechar productivamente (“circularizar”) su contenido de materia orgánica y nutrientes.

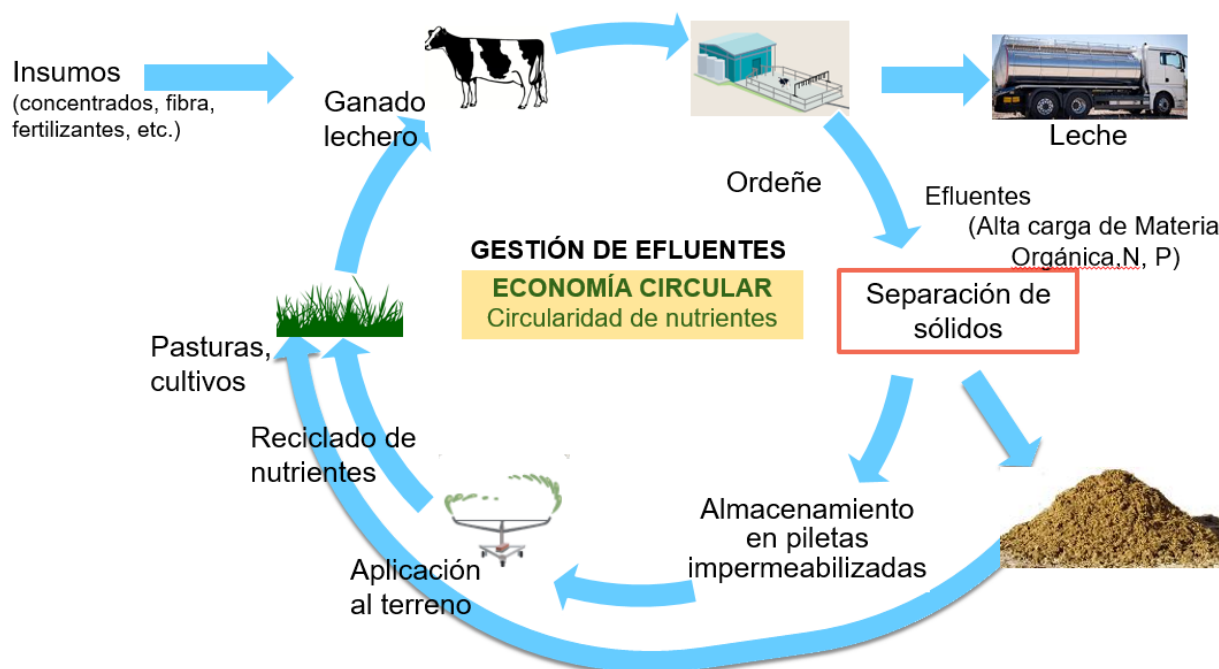


Figura 3. Sistema de gestión de efluentes de tambo incluyendo la etapa de separación de sólidos

Como sistemas de separación de sólidos, tradicionalmente se han empleado en Uruguay unidades de **separación pasiva por sedimentación**, conocidas habitualmente como “**estercoleros**” o “trampas de sólidos”. Generalmente van precedidas de una unidad de separación de áridos (arenas, grava u otros sólidos groseros) por sedimentación. Algunos de los inconvenientes que presenta el uso de estercoleros son los siguientes:

- eficiencia de separación muy variable dependiendo del grado de ensuciamiento;
- operación de limpieza trabajosa y que requiere del uso de maquinaria apropiada (tractor con pala frontal, retroexcavadora combinada, o similar);
- sólidos muy húmedos al momento de ser retirados del estercolero, requiriendo un área impermeabilizada importante para su secado.

En lo últimos años ha comenzado a emplearse otro tipo de equipos de separación, que buscan resolver los problemas mencionados. Son equipos mecánicos, que llevan asociado siempre un consumo de energía eléctrica, ya sea para bombeo del líquido alimentado o, en algunos casos, para accionamiento de las partes móviles del propio equipo, con su consecuente requerimiento de mantenimiento. Como contrapartida, se mencionan las siguientes ventajas:

- mayores eficiencias de separación de sólidos;
- material sólido con menor contenido de humedad (y en consecuencia, menor volumen y peso de material a manejar);
- operación de manejo de sólidos más simple

Los principios físicos de funcionamiento en que se basan los separadores mecánicos de sólidos disponibles actualmente en el mercado son diferentes al fundamento de la tecnología dominante hasta el momento. En efecto, los **estercoleros** son equipos pasivos, que se fundamentan en separación sólido – líquido por sedimentación gravitatoria, lograda en base a un diseño que disminuye la velocidad de flujo y aporta un área de sedimentación suficiente. El dimensionamiento se hace en base a la tasa superficial de aplicación, asumiendo sedimentación discreta de tipo stokesiano. A medida que el estercolero se va llenando de sólidos sedimentados, actúan otros fenómenos, que en algunos casos son negativos para su funcionamiento (por ejemplo, canalizaciones de líquido, o flotación de los sólidos, con riesgo de arrastres), o en otros casos pueden contribuir a la separación (por ejemplo, efecto de filtración a través de la capa de sólido ya sedimentado).

En el caso de los “**hidrotamices**” o “pantallas”, la separación sólido – líquido se produce por mecanismos diferentes a la sedimentación por gravedad. En este caso, el diseño de la malla del hidrotamiz hace que opere en primer lugar un mecanismo de **tamizado** (separación por tamaño de partículas), y conjuntamente una **separación hidrodinámica** (basada en el efecto Coanda) que tiende a apartar las trayectorias de movimiento inercial de las partículas sólidas en relación a las líneas de flujo del líquido.

En el caso de las **extrusoras de tornillo**, la separación se logra en primer lugar por **tamizado** por pasaje del efluente a través de ranuras de cierto tamaño. En algunos casos existe un efecto adicional de retención por **filtración y prensado** sobre la propia capa de sólido dentro del equipo.

Es un hecho conocido que los sólidos contenidos en los efluentes de tambos presentan una distribución de tamaños de partículas multimodal en el rango comprendido entre 0,4 μm y algunos milímetros (Gutiérrez et al. 2004). Esta distribución de tamaños depende de

características propias de cada establecimiento, como ser: alimentación del ganado, método de limpieza de las instalaciones, o existencia de patios de alimentación. Según su tamaño, las partículas pueden generar diferentes efectos en los sistemas de gestión de efluentes:

- obstrucción de tuberías con sólidos groseros;
- colmatación de lagunas por sólidos sedimentables (incidiendo en su frecuencia de limpieza y en los costos de operación);
- disminución de transparencia del líquido e interferencia en algunos procesos biológicos por parte de los sólidos supracoloidales.

Considerando que los mecanismos físicos de separación en que se basan los equipos difieren en sus fundamentos, resulta relevante determinar para cada tecnología la eficiencia de separación, no sólo de los sólidos de mayor tamaño, sino también de las diferentes fracciones de tamaño.

Los valores de eficiencia de remoción de sólidos para los separadores mecánicos reportados suelen adolecer de indefinición en cuanto al tipo de sólidos al que están referidos (sólidos totales, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables) y en general, no discriminan por tamaño de partícula. Adicionalmente, las evaluaciones de los equipos importados que se realizan en origen, lo hacen con efluentes de tambo que corresponden a otras realidades productivas y no son necesariamente extrapolables a la realidad nacional.

En este trabajo, se realizó una evaluación de los equipos que contempla una caracterización de los sólidos presentes en los efluentes de tambo nacionales mediante fraccionamiento en cuatro rangos de tamaño, utilizando métodos disponibles habitualmente en laboratorio, como ser tamizado y filtración.

Los resultados presentados corresponden a un estudio de casos realizado por la consultora ambiental PraxisLab para el Proyecto BIOVALOR, en el cual se determinó la eficiencia de separación según rango de tamaño de partículas para cuatro separadores mecánicos diferentes y un separador por gravedad, operativos en tambos uruguayos. También se caracterizó el sólido generado en cada sistema, con vistas a su aplicación productiva al terreno, reciclando nutrientes y materia orgánica. Los datos se refieren exclusivamente a los casos estudiados, con sus particularidades, por lo cual no se consideran de validez general o estadística, pero aportan elementos para la caracterización del funcionamiento de los equipos.

3. Metodología

3.1. Selección de casos estudiados

Se buscó evaluar diferentes tipos de equipos, realizando la selección de los casos en base a sugerencias de proveedores presentes en el mercado nacional, que permitieran asegurar que los equipos operaban correctamente. Dada la diversidad de los tambos uruguayos, esto llevó a que los establecimientos seleccionados tuvieran características productivas diversas, lo cual fue tenido en cuenta al momento de realizar la comparación de los resultados obtenidos mediante esta lógica de “estudio de casos”.

En la Tabla 1 se presentan datos generales de los tambos en los cuales se hicieron los relevamientos de los separadores.

Tabla 1. Características productivas de los casos estudiados

Sistema de separación		Caso 1	Caso 2	Caso 3 ^(a)	Caso 4	Caso 5
Tipo de equipo		Estercolero	Prensa inclinada	Prensa Inclinada	Prensa horizontal	Tamiz
Cantidad de vacas en ordeño		880	500	85	450	190
Tiempo diario de ordeño (hs)		10	7	24	4	4
Consumo de agua (L/VO/d)		68 ^(d)	60	s/d	22 ^(e)	66
Reciclo de efluente para limpieza		SI	NO	NO	SI	NO
Uso de patio de alimentación ^(b)		SI ^(c)	SI	NO	SI	NO
Tipo de alimentación	Pasturas	27%	30	71	30	27
	Fardos y otras fibras	33%	35	--	36	44
	Concentrados	30	35	29	34	29

(a) El Caso 3 es un tambo automatizado de ordeño voluntario, con dos robots de ordeño, que está disponible para las vacas durante todo el día. Por eso el tiempo diario de ordeño se informa como "24 horas".

(b) Indica si el patio de alimentación se estaba usando al momento de realizar el muestreo.

(c) El efluente del patio de alimentación no va al estercolero.

(d) Corresponde a agua limpia más recirculación de efluente. No se dispone de datos por separado.

(e) El valor corresponde al consumo de agua limpia, al que se agregan 80 L/VO/d de efluente recirculado para lavado de corrales y patio de alimentación.

En la Tabla 2 se presentan datos generales de los diferentes separadores mecánicos evaluados.

Tabla 2. Características de los sistemas de separación mecanizados de separación

		Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Potencia del separador (kW)		2.1	2,3	5,5	No aplica
Apertura de malla (mm)		2,0	2,0	0,8	1,0
Bomba de alimentación	Tipo	Centrífuga, eje largo, en pozo	Centrífuga eje largo, sobre balsa	Tornillo, succionando de pozo	Centrífuga, eje largo, con triturador, en pozo
	Potencia (kW)	6.2	5.9	4.1	18.8
	Caudal (m3/h)	8	35	25	19
Agitación del pozo	Tipo	Por recirculación de líquido	Agitador de paletas sobre balsa	Agitador de paletas, externo	Tobera de recirculación de líquido
	Potencia (kW)	Incluida en potencia de bombeo	2,3	5,6	Incluida en potencia de bombeo

Las bombas de alimentación los Casos 2, 3 y 5 eran del tipo centrífugo, de eje largo. La del Caso 5 (tamiz) estaba provista de cuchillas de corte para evitar obstrucciones. La bomba de alimentación del Caso 4 era de desplazamiento positivo (tornillo o “moyno”). Para los Casos 2 y 5 la agitación en el pozo de bombeo se lograba mediante recirculación del líquido con la bomba de alimentación del separador. Para los casos 3 y 4, el pozo de bombeo tenía un agitador mecánico de paletas, para homogeneizar el material.

A continuación se detallan y discuten los diferentes casos.

3.1.1. Caso 1: Estercolero

El estercolero relevado consiste en una estructura de hormigón armado (Figura 4), con las siguientes dimensiones:

- largo total 15 m;
- ancho 3.5 m;
- profundidad máxima 1.7 m;
- capacidad útil 49 m³.



Figura 4. Caso 1, estercolero. De izquierda a derecha: al inicio, luego de una semana, luego de 2 semanas

En este sistema la corriente afluyente ingresa al estercolero directamente desde la sala de ordeño y corral de espera (“Entrada”, ver esquema en la Figura 5) y por flotación y gravedad se separan los sólidos sedimentables y suspendidos. Los líquidos separados (“Salida Líquida”) rebosan por una T hacia la laguna o pileta de acumulación. Los sólidos permanecen en el estercolero hasta que son separados del sistema en un plazo aproximado de 15 días, o cuando visualmente se determina que el estercolero completó su capacidad con sólidos retenidos. Se procede entonces a la limpieza mediante barrido usando tractor con pala frontal. Los sólidos retirados del estercolero (“Sólidos separados”) son depositados en el área de escurrimiento y secado ubicada en este caso junto al estercolero; los líquidos separados de los sólidos fluyen por gravedad nuevamente hacia el estercolero.

En el caso particular de este separador de sólidos, se realizaron tres muestreos de efluentes: uno al día siguiente de una limpieza del equipo, otro a la semana siguiente, y otro luego de dos

semanas de operación. Esto permite evaluar la variación de la eficiencia a medida que el equipo se va colmatando de sólidos (ver Figura 44). A su vez, se conformaron muestras compuestas de los líquidos de entrada y de salida, mezclando volúmenes iguales de las tres muestras individuales de cada punto. Los parámetros analizados se indican en el numeral 3.3. Se calcularon eficiencias globales de remoción de a partir de estas muestras compuestas de entrada y salida de líquido.

En este caso, como los sólidos son separados al cabo de 15 días, se realizó un balance considerando todo el periodo de evaluación.

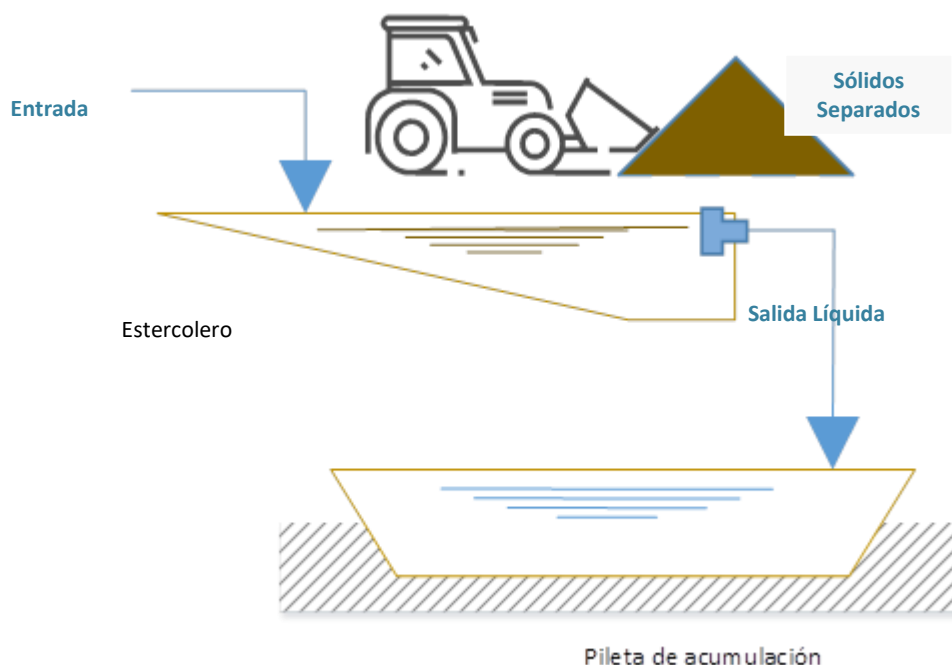


Figura 5. Esquema del Separador del Caso 1 – Estercolero

3.1.2. Caso 2: Prensa extrusora de eje inclinado 1

Los datos de este equipo se presentaron en la Tabla 2. En la Figura 6 se muestra un diagrama de flujo esquemático del sistema en su conjunto. El mismo está compuesto por un pozo de bombeo, desde donde el efluente homogeneizado por recirculación, es enviado al equipo de separación ("Entrada"). Para el caso en que el caudal de líquido alimentado sobrepase la capacidad de procesamiento de la prensa extrusora (o si se produce algún tipo de obstrucción de la malla), el equipo cuenta con dos reboses, a diferentes alturas de la tolva de alimentación. Cuando el nivel de líquido alcanza alguno de esos reboses, el exceso de efluente retorna al pozo de bombeo (ver "Retorno" en la Figura 6 y detalle en Figura 7).

Luego de la separación, la corriente líquida fluye por gravedad hacia la pileta de acumulación ("Salida Líquida") y los sólidos separados se acopian formando una pila sobre piso impermeable

("Sólido separado"), como se muestra en las Figuras 7 y 8. El líquido que escurre desde la pila de residuos se canaliza hacia la Pileta de acumulación. Esta corriente es mínima, pero lo suficientemente significativa para ser considerada al realizar balances de masa del sistema.

El Caso 2 corresponde a una prensa que se encuentra en operación desde hace por los menos 5 años. Según informó el productor, el equipo ha sido usado con mallas de diferente apertura, siendo la de 2 mm de luz la seleccionada finalmente, por ocasionarle menos problemas de obstrucciones.

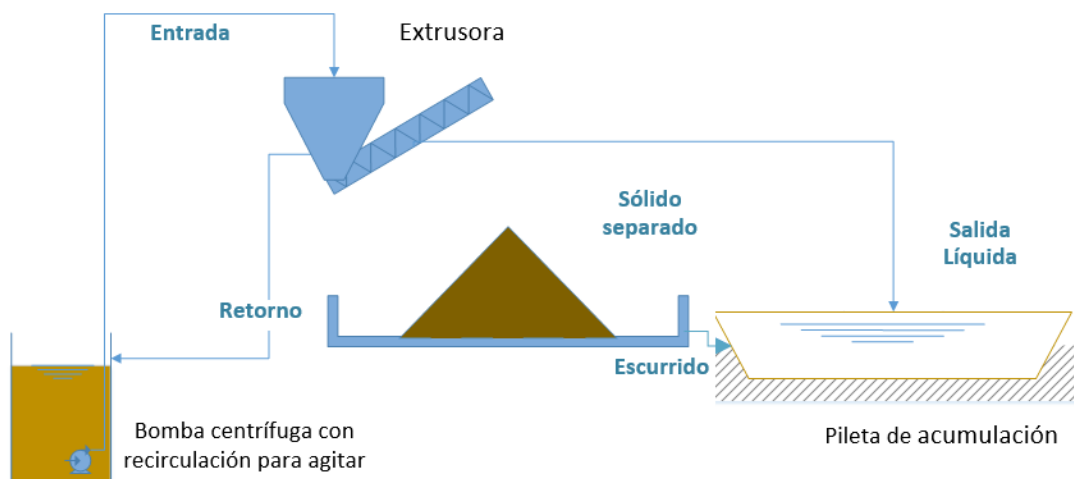


Figura 6. Esquema del sistema de separación de sólidos del Caso 2



Figura 7. Caso 2 - Prensa inclinada 1.

La tubería blanca corresponde a los reboses y retorno de exceso de efluente.



Figura 8. Sólidos separados en el Caso 2. Nótese la presencia de líquido que escurre de la pila de sólidos.

3.1.3. Caso 3: Prensa extrusora de eje inclinado 2

Los datos generales del Caso 3 se presentaron en las Tablas 1 y 2. Corresponden a una prensa inclinada muy similar a la del Caso 2, pero de muy reciente instalación al momento de la evaluación. La configuración general del sistema del Caso 3 (ver Figura 9) es similar a la del Caso 2, aunque con dos diferencias: a) la homogeneización del líquido a alimentar se realiza mediante un agitador de paletas y de eje vertical, colocando en una balsa en el pozo de bombeo; b) la distancia entre el pozo de bombeo y la prensa es sustancialmente menor en esta caso, comparado con el Caso 2.

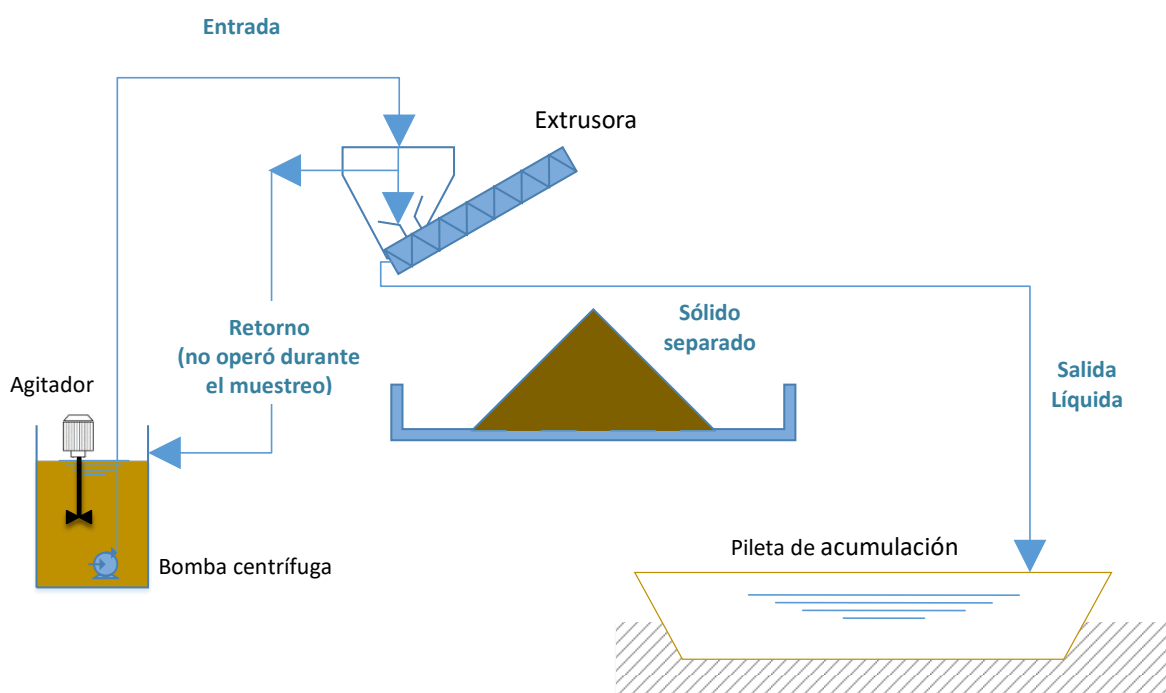


Figura 9. Esquema del sistema de separación de sólidos del Caso 3

Para el balance de masa se debe considerar que, durante el muestreo no existió corriente de retorno (rebose) por lo que el caudal de entrada corresponde con la corriente impulsada por la bomba hacia la prensa. A su vez, no se observó que escurriera líquido de la pila de los sólidos separados, como se muestra en la Figura 11.



Figura 10. Caso 3 - Prensa inclinada 2



Figura 11. Sólidos separados en el Caso 3, sin líquidos libres

3.1.4. Caso 4: Prensa extrusora de eje horizontal

Los datos generales del Caso 4 se presentaron en las Tablas 1 y 2. La configuración general del sistema del Caso 4 se presenta en la Figura 12. El sistema cuenta con un pozo de bombeo con agitador de paletas y bomba de impulsión del tipo de tornillo o de “cavidad progresiva”. La prensa extrusora horizontal cuenta con sistema de rebose de exceso de líquido (que no se activó durante el muestreo). El líquido que sale de la extrusora es alimentado a un biodigestor anaerobio. El sólido separado no presentó líquidos libres.

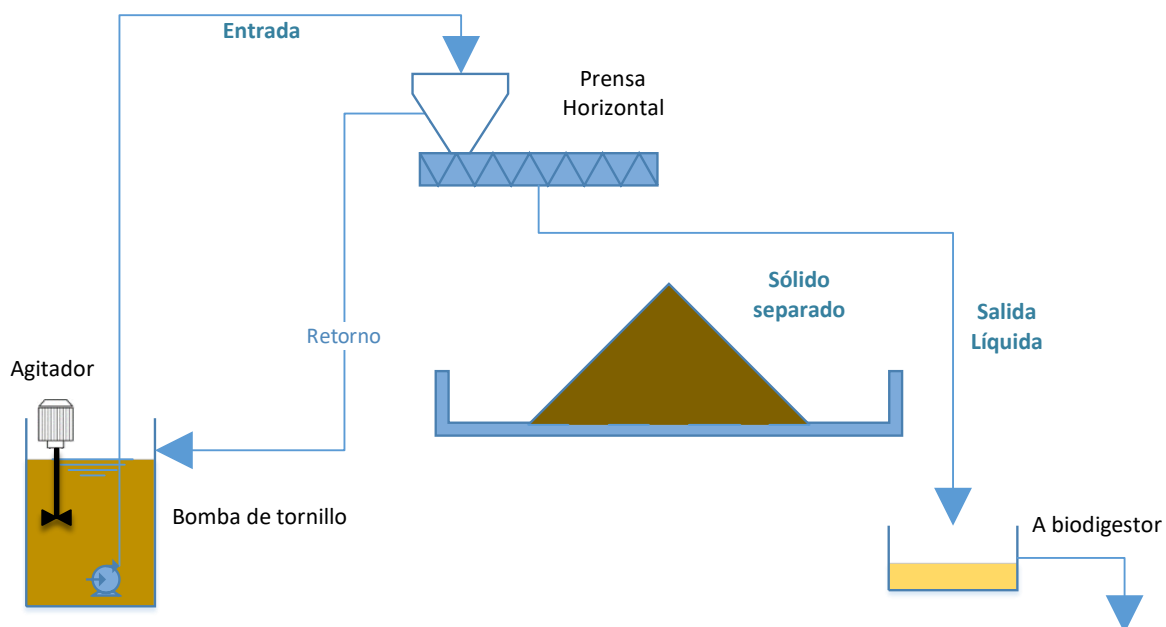


Figura 12. Esquema del sistema de separación de sólidos del Caso 4



Figura 13. Caso 4, Prensa extrusora horizontal



Figura 14. Sólidos separados en el Caso 4, sin agua libre

3.1.5. Caso 5: Tamiz o “pantalla”

Los datos generales del Caso 5 se presentaron en las Tablas 1 y 2. La configuración general del sistema del Caso 5 se presenta en la Figura 15. El pozo de bombeo, donde se recibe el efluente de limpieza de la sala y del corral de espera, cuenta con una bomba centrífuga de eje largo para impulsión del efluente hacia el tamiz de perfil parabólico (también conocido como “pantalla”). La bomba cuenta con un sistema de tritución de sólidos y una tobera que permite la recirculación de una fracción del efluente impulsado, favoreciendo la mezcla en el pozo.

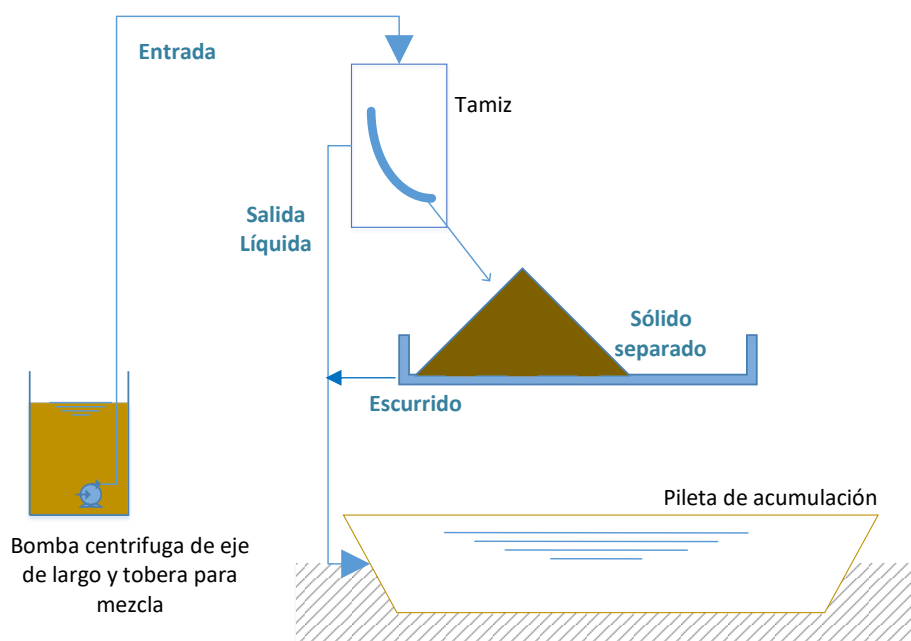


Figura 1. Esquema del sistema de separación de Sólidos del caso 5

El líquido que atraviesa el tamiz fluye por gravedad hacia una pileta de acumulación. Los sólidos separados en el tamiz presentaban líquidos libres en este caso, circunstancia que debe considerarse para el balance de masa del sistema. En la Figura 16 se muestran imágenes del tamiz.



Figura 16. Caso 5, Tamiz. Izquierda: vista general de la instalación; derecha: detalle de la malla

3.2. Muestreo y mediciones en campo

Para cada uno de los sistemas de separación se extrajo de una muestra compuesta volumétrica del líquido alimentado a cada equipo (entrada) y otra del líquido tratado (salida), abarcando la totalidad del período de funcionamiento del separador, luego de una operación de limpieza de la sala y el corral de espera, posterior a un ordeño. En el Caso 4, también se incluyó el efluente resultante del lavado por inundación del patio de alimentación.

Para la extracción de las muestras de líquidos se aplicó la metodología recomendada por Taverna et al. (2014).

En todos los casos se tomaron muestras representativas de los sólidos separados por cada sistema. Las muestras de sólidos fueron extraídas inmediatamente luego de finalizada la limpieza del estercolero o de finalizada la operación de los separadores mecánicos, haciendo muestreo compuesto a distintas profundidades de las pilas de sólido.

Se midieron los caudales de entrada y salida de líquido a cada equipo, por método volumétrico (“balde y cronómetro”). También se midieron las dimensiones de las pilas de sólidos separados durante el ciclo de operación, para cálculo del volumen. En base a estos datos, se realizaron balances de masa para cada sistema.

Para los equipos mecanizados se relevaron los consumos de energía eléctrica, utilizando una pinza amperimétrica (medida de intensidad y voltaje).

En el caso particular del estercolero se contabilizaron los viajes de tractor desde el estercolero a la planchada de escurrimiento durante la limpieza de los sólidos, para estimar consumos de combustible y horas de operación.

3.3. Análisis de laboratorio

A las muestras de sólidos separados por cada equipo se le analizaron en laboratorio los siguientes parámetros: Sólidos Totales, Sólidos Volátiles, Nitrógeno total, Fósforo total y Potasio. Los métodos de análisis de sólidos fueron los del “Standard Methods” (APHA et al., 2005). Nitrógeno Total se analizó por el método de Kjeldahl. Para Fósforo y Potasio se realizó digestión de la muestra y posterior aplicación de los métodos APHA (2005).

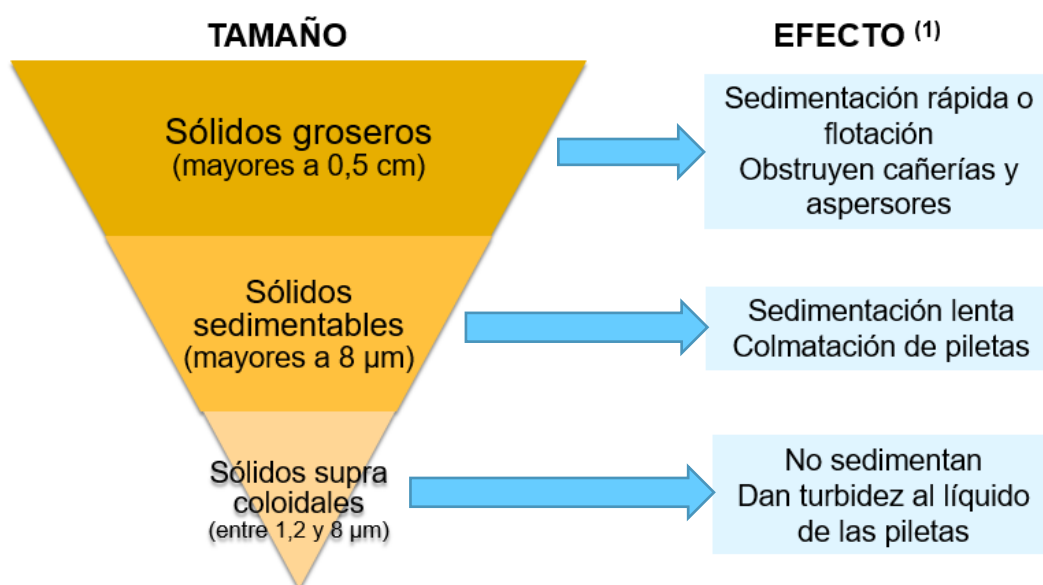
En cada muestra líquida se analizó el contenido de materia orgánica (expresada como Demanda Química de Oxígeno, DQO), Sólidos Sedimentables, Sólidos Totales, Sólidos Suspendidos Totales, Fijos y Volátiles, Nitrógeno total, Fósforo Total y Potasio. Los métodos de análisis fueron los del “Standard Methods” (APHA et al., 2005). Para cada parámetro se calculó la eficiencia de separación de los distintos sistemas evaluados.

Todos los análisis se realizaron por lo menos por duplicado, y en muchos casos por triplicado. Los valores informados en el capítulo de “Resultados” corresponden a promedios de resultados concordantes.

3.3.1. Fraccionamiento por tamaño

Resulta de interés poder cuantificar la presencia de partículas sólidas de diferentes tamaños que se encuentran presentes en el efluente de entrada y salida de los sistemas de separación, y evaluar las eficiencias de separación para cada fracción de tamaño de partículas. En efecto, se reportado que dichas fracciones están asociadas a diferentes efectos en los sistemas de gestión de efluentes (ver Figura 17), que pueden plantear diferentes desafíos a la hora de diseñarlos y operarlos. De acuerdo con Gutiérrez y Cabrera (2006), la fracción de sólidos gruesos se asocia con la obstrucción de cañerías y aspersores. En cambio, los sólidos sedimentables tienen como principal efecto la colmatación de las lagunas. Los sólidos supracoloidales producen turbidez en el líquido de las lagunas, dificultando la penetración de la luz solar, y limitando de esa manera el crecimiento de organismos fotosintéticos.

Con esa finalidad, se realizó en laboratorio el fraccionamiento por tamaño de los sólidos presentes en los líquidos de entrada y salida de cada sistema, y se caracterizó analíticamente cada fracción, adaptando la metodología aplicada por Van Nieuwenhuijzen (2002) para efluentes cloacales. Sobre las muestras líquidas, se realizó en primer lugar un tamizado con malla metálica de apertura de acuerdo al equipo, simulando el efecto mecánico del separador (en el caso del estercolero, adicionalmente se realizó sedimentación en laboratorio durante 48 horas). El líquido resultante del tamizado fue posteriormente filtrado con papel de porosidad conocida (8 μm). El líquido resultante de la filtración fue filtrado nuevamente, con membrana de celulosa de 1,2 μm de tamaño de poro.



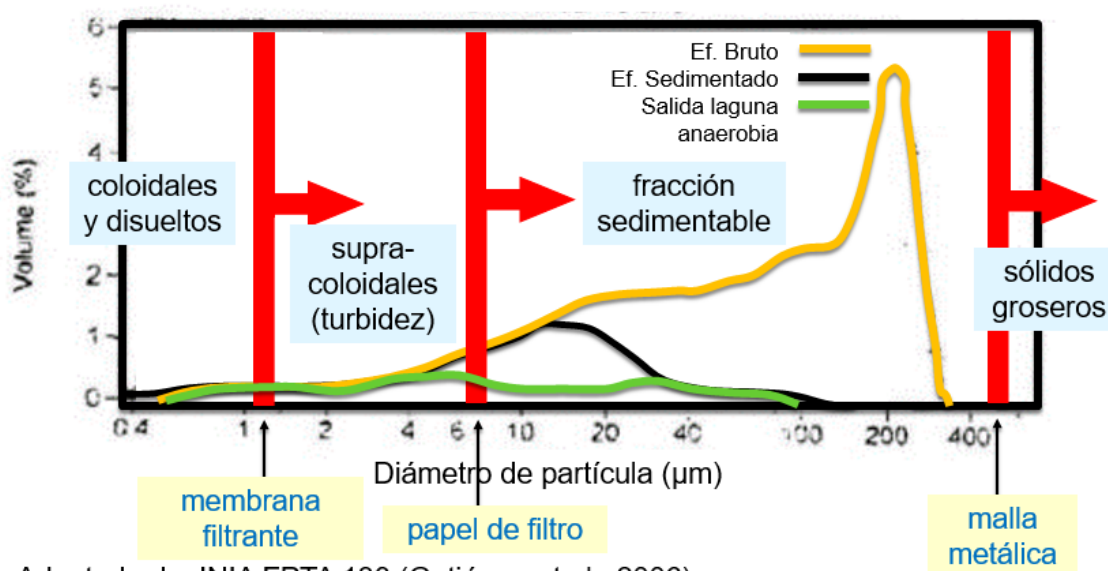
(1) Basado en: Gutiérrez & Cabrera *op. cit.* (2006)

Figura 17. Tipos de sólidos por tamaño y efecto

Por diferencia se calcularon los valores de los parámetros anteriores asociados a cada fracción de tamaño de partícula:

- **Fracción mayor a 0,5 mm** Se trata de sólidos groseros, tamizables y/o rápidamente sedimentables
- **Fracción entre 0,5 mm y 8 μ m** Fracción integrada por sólidos lentamente sedimentables, capaces de colmatar lagunas.
- **Fracción entre 8 y 1,2 μ m** Se trata de partículas supracoloidales, capaces de producir turbidez en el líquido.
- **Menores de 1,2 μ m** Sólidos disueltos.

La elección de los valores concretos de los “criterios de corte” entre categoría de sólidos, si bien es en cierto modo arbitraria, está basada en un fundamento operativo. Se eligieron medios de fraccionamiento habituales en cualquier laboratorio de análisis de efluentes, con la intención de que la metodología pueda ser fácilmente replicada en el futuro. Y la elección tuvo en cuenta los rangos de valores habitualmente utilizados para definir las categorías de fracciones sólidas en efluentes (Van Nieuwenhuijzen, 2002). En ese sentido, se incluye en la Figura 18 una comparación de la curva de distribución experimental de tamaños de partículas, medida por Gutiérrez y Cabrera (2006) en diversos efluentes de tambos uruguayos, con los límites de corte establecidos por los elementos de fraccionamiento elegidos en este trabajo.



Adaptado de: INIA FPTA 138 (Gutiérrez et al., 2006)

Figura 18. Distribución de tamaños de partículas (expresada como porcentaje en volumen del total de los sólidos), medida por Gutiérrez y Cabrera (2006) para efluente bruto de tambo, y el mismo efluente luego de sedimentado y a la salida de una laguna anaerobia. Se compara con los rangos de sólidos manejados en este trabajo, en base a los criterios de fraccionamiento usados a nivel de laboratorio.

4. Resultados

4.1. Caracterización del Efluente Bruto

En la Tabla 3 se presentan los resultados de caracterización del efluente bruto (“Entrada”) para cada uno de los tambos relevados.

Tabla 3. Propiedades del efluente Bruto generado en cada establecimiento

Casos	Sólidos sedimentables (mL/L)	Sólidos Totales (mg/L)	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	Sólidos suspendidos volátiles (mg/L)	DQO (mgO ₂ /L)	Fósforo (mg/L)	Nitrógeno total (mg/L)	Potasio (mg/L)
Caso 1	185	11800	9200	7100	16900	118	915	410
Caso 2	440	24100	17700	13900	27100	150	813	560
Caso 3	90	7200	4200	3400	9300	58	348	200
Caso 4	180	13000	7700	5500	13200	100	595	670
Caso 5	200	13550	10300	7800	14500	102	650	310
Promedio	219	13930	9820	7540	16200	106	664	430
CV(%)	60	45	51	52	41	32	33	44

Como es posible observar en la Tabla anterior, el efluente generado en los distintos establecimientos presenta una alta variabilidad, tal como lo reflejan los valores de los Coeficientes de Variación (CV) para cada parámetro analizado. Como fuera mencionado anteriormente, la realidad productiva y las condiciones operativas de los tambos nacionales son muy variadas. Se ha identificado que la generación y características del efluente bruto depende de factores tales como el consumo de agua por vaca en ordeño, el tiempo de permanencia de los animales en el área de ordeño, el tipo de alimentación, entre otros (Gutiérrez et al., 2009).

En este sentido, se observa por ejemplo que las concentraciones del efluente bruto correspondientes al Caso 2 son significativamente mayores que las de los restantes casos. Esto se atribuye al mayor tiempo de permanencia del ganado en el patio de alimentación de ese tambo, lo cual origina una mayor colecta de excretas. En el Caso 3 se obtuvieron concentraciones comparativamente menores de los parámetros del efluente bruto; esto se atribuye a que la cantidad de vacas en ordeño en el momento del muestreo era menor al tamaño de diseño del tambo (y no había una reducción proporcional del uso de agua).

A través de los años de estudios se ha buscado parametrizar esta variabilidad de forma de poder estimar las características de los efluentes de tambo en base a la operativa de los establecimientos. Así por ejemplo, Gutiérrez et al. (2009) y Gutiérrez y Cabrera (2009) realizaron propuestas de estimadores nacionales, en base resultados de relevamientos de campo, y propusieron estimadores de concentración de los diferentes parámetros (Materia orgánica como DQO, Nutrientes) en el efluente bruto a partir de la concentración de Sólidos Suspendidos Volátiles. En ese caso, resulta de una variabilidad razonable si los valores de los parámetros se expresan en relación a la masa de Sólidos Suspendidos Volátiles.

En la Tabla 4 se presentan los valores de concentración de la Tabla 3 expresados por unidad de Sólidos Suspendidos Volátiles, y se comprueba que también en este caso la variabilidad entre

casos disminuye significativamente (menores valores de los CV) con esta forma de expresión de los datos.

Los valores promedio de los estimadores generados con los resultados obtenidos en este estudio son del mismo orden, y en algunos muy similares, a los reportados por Gutiérrez et al. (2012).

Tabla 4. Caracterización de efluente bruto, presentada como relación respecto a los SSV.

Caso de estudio	Sólidos Sedimentables /SSV (mL/mg)	Sólidos Totales/SSV (mgST/mgSSV)	Sólidos Suspendidos Totales/ SSV (mgSST/mgSSV)	DQO / SSV (mgO ₂ /mgSSV)	Fósforo total (mgP/mgSSV)	Nitrógeno total (mgN/mgSSV)	Potasio (mgK/mgSSV)
Estercolero	0.026	1.66	1.30	2.38	0.017	0.13	0.06
Prensa inclinada 1	0.032	1.73	1.27	1.95	0.011	0.06	0.04
Prensa inclinada 2	0.026	2.12	1.24	2.74	0.017	0.10	0.06
Prensa horizontal	0.033	2.36	1.40	2.40	0.018	0.11	0.12
Tamiz	0.026	1.74	1.32	1.86	0.013	0.08	0.04
Promedio	0.029	1.92	1.30	2.3	0.015	0.10	0.06
CV (%)	12%	16%	5%	16%	20%	28%	53%
Gutiérrez & Cabrera (2012)				1.6	0.018	0.11	0.10

Puede lograrse una estimación razonable de la concentración de Sólidos Suspendidos Volátiles en el efluente bruto a partir de:

- la masa de sólidos excretados, calculada mediante la ecuación presentada por Nennich et al. (2005) (que relaciona las excretas con el dato de producción de leche diaria)
- el tiempo de permanencia del ganado en la zona de ordeño (que determina la fracción de las excretas diarias que son colectadas)
- y del consumo de agua de lavado por vaca en ordeño, que establece el grado de “dilución” del efluente.

En resumen: a partir exclusivamente de datos operativos del tambo (producción de leche, tiempo de ordeño, consumo de agua de lavado) es posible predecir la concentración de SSV. Y a partir de ese dato, estimar las concentraciones de DQO, Sólidos Sedimentables, Sólidos Totales, Sólidos Suspendidos Totales, Fósforo, Nitrógeno y Potasio, a partir de los estimadores de las Tabla 4.

Esta metodología de cálculo puede resultar de utilidad a los efectos de realizar un diseño preliminar de los sistemas de gestión de efluentes de tambo, estimando la composición del efluente bruto cuando se trata de nuevas salas de ordeño a instalar, o cuando no se dispone de datos analíticos.

4.2. Eficiencias de separación de sólidos

A partir de los datos de concentraciones de salida medidos en cada caso, se calculan las eficiencias de separación de los diferentes parámetros. Respecto a la expresión de las eficiencias, en la bibliografía se mencionan diferentes fórmulas de cálculo.

Así por ejemplo Hjorth et al. (2010) definen la **Eficiencia de Remoción** como:

$$R(x) = 1 - \frac{c(x)_{\text{salida líquida}}}{c(x)_{\text{entrada}}}$$

Donde:

$R(x)$: Eficiencia de Remoción del parámetro x

$c(x)_{\text{salida líquida}}$: Concentración del parámetro x en la corriente de líquida de salida

$c(x)_{\text{entrada}}$: Concentración del parámetro x en la corriente de entrada al separador (efluente bruto)

Asimismo, Hjorth et al. (2010) definen el **Índice de Separación** como:

$$E(x) = \frac{m(x)_{\text{sólido}}}{m(x)_{\text{entrada}}}$$

Donde:

$E(x)$: Índice de Separación del parámetro x

$m(x)_{\text{sólido}}$: Masa del parámetro x en el sólido separado

$m(x)_{\text{entrada}}$: Masa del parámetro x en la corriente de entrada al separador (efluente bruto)

Para cada sistema se utilizan los datos experimentales de concentraciones y caudales de las diferentes corrientes (entrada, salida líquida, sólidos separados) para plantear los balances de masa en los distintos parámetros, y calcular las Eficiencias de Remoción y los Índices de Separación.

4.2.1. Caso 1 - Estercolero

En la Tabla 5 se presentan los resultados de concentración de entrada y salida para el estercolero. Los valores informados corresponden a los resultados de análisis de las muestras compuestas de las dos semanas de operación (muestra inicial, semana 1 y semana 2).

Tabla 5. Concentraciones de entrada y salida, y Eficiencias de Remoción para el Caso 1.

	S SED (mL/L/h)	ST (mg/L)	SST(mg/L)	DQO (mg/L)	K (mg/L)	P (mg/L)	N (mg/L)
Entrada (Compuesta)	185	11800	9200	16900	410	118	915
Salida líquida (Compuesta)	50	8050	5300	9500	564	100	870
Eficiencia de Remoción (R)	73%	32%	42%	44%	-38%	15%	4.9%

Para el Balance de masa para el estercolero se tiene una única corriente de entrada (Entrada), mientras que la salida es la suma de las corrientes de Salida Líquida y de Sólidos separados.

En la Tabla 6 se presenta el balance de masa en el sistema del Caso 1 para los diferentes parámetros. Considerando el parámetro Sólidos Totales en la corriente de entrada resulta que ingresan al sistema al cabo de los 15 días de operación 7930 kg. En las corrientes de salida se

cuantificaron en total 8007 kg de Sólidos Totales. La diferencia entre la entrada y la salida en Sólidos Totales representan el 1 % (77 kg). Teniendo en cuenta las incertidumbres asociadas a las metodologías utilizados en los muestreos y en los análisis, este valor es muy adecuado. Los macro nutrientes Nitrógeno, Fosforo y Potasio, presentan apartamientos mayores a los calculados para los Sólidos Totales y Sólidos Suspendidos. Esa falta de ajuste en los balances puede ser atribuible a la dificultad de obtener una muestra homogénea del sólido separado, y a la incertidumbre asociada a una baja frecuencia de muestreo a lo largo del período de dos semanas.

En el caso del Potasio, se encontró un apartamiento muy significativo en el balance, en donde la concentración de Potasio en suma de las corrientes de salida es significativamente mayor que en la entrada. No se ha podido asignar una causa a ese resultado; se sospecha de alguna interferencia analítica.

Tabla 6. Balance de masa en el sistema del Caso 1 para los diferentes parámetros

	Sólidos Totales	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Sólidos Suspendidos Totales
Entrada (kg)	7930	547,7	79,3	276,2	6149
Suma de salidas (Corriente Líquida + Sólidos Separados) (kg)	8007	631,1	70,7	372,8	5931
Diferencia de balance (kg)	-77	-83	9	-97	218
Diferencia de balance (%)	-1,0%	-15,2%	10,9%	-35,0%	3,5%

Una vez verificados los balances de masa, se calcula la Eficiencia de Remoción del equipo (es la capacidad de retirar el compuesto de la corriente líquida). Se calcula también el Índice de Separación, que representa la eficiencia en la separación en masa, considerando los parámetros en la corriente de sólidos con respecto a la corriente de entrada. Los datos se presentan en la Tabla 7 y se grafican en la Figura 19.

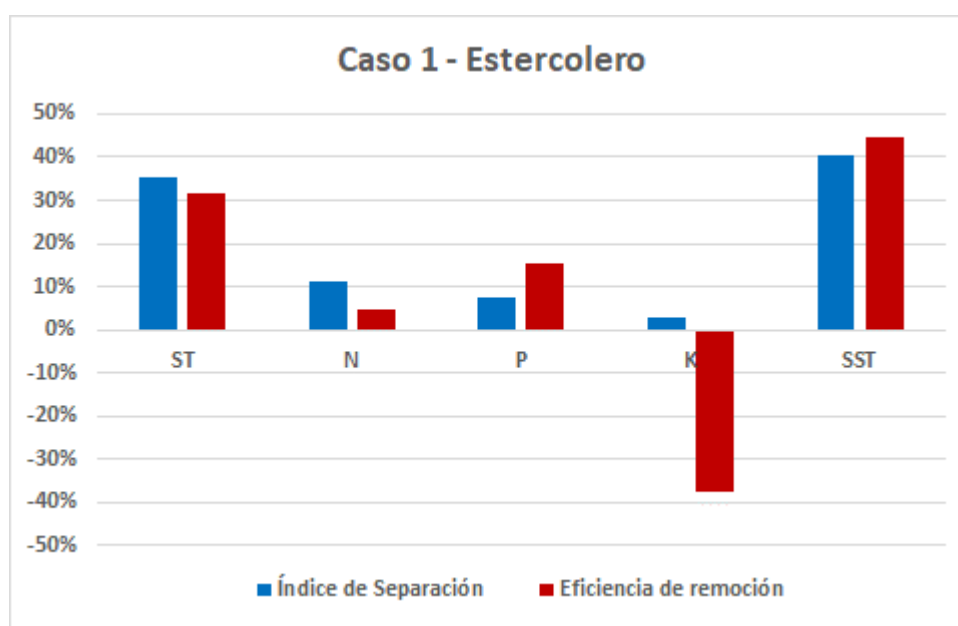


Figura 19. Evaluación de eficiencias del Caso 1

Tabla 7. Caso 1 - Índice de separación y eficiencia de remoción para diferentes parámetros

Parámetro	Índice de separación (en masa)	Eficiencia de Remoción (en concentración)
Sólidos Totales	35,3%	31,8%
Nitrógeno	12,5%	-6,7%
Fósforo	7,6%	15,3%
Potasio	2,9%	-37,2%
Sólidos Suspendidos Totales	40,7%	44,2%

La Eficiencia de Remoción de Sólidos Totales superó el 30 %; en Sólidos Suspendidos Totales fue superior al 40%. En el caso de los nutrientes, las Eficiencias de Remoción son menores, indicando que la mayor parte de los nutrientes se encuentran disueltos, y poco asociados a los sólidos que se separan.

El valor negativo de Eficiencia de Remoción de Nitrógeno representa un aumento de concentración en el líquido de salida en relación al de entrada. Una posible hipótesis explicativa para el caso particular del estercolero, en el que los sólidos sedimentados permanecen durante dos semanas dentro del sistema, podría ser que existiera una disolución de parte del Nitrógeno del sólido hacia la fase líquida.

Como se indicó previamente (numeral 3.1.1) en el caso del estercolero, además de la muestra compuesta, se analizaron muestras de cada semana, para determinar la evolución de la eficiencia del sistema a medida que se va colmatando con sólidos. En la Tabla 8 se presenta la evolución temporal de la Eficiencia de Remoción (R) de los parámetros más relevantes, para las muestras semanales extraídas del estercolero.

Tabla 8. Evolución temporal de las eficiencias de remoción en el estercolero para los parámetros más relevantes

Tiempo desde limpieza (Semanas)	Eficiencias de remoción (%)			
	Sólidos Sedimentables	Sólidos Totales	Sólidos Suspendidos	DQO
0	94%	29%	48%	39%
1	91%	36%	59%	54%
2	54%	30%	48%	38%

Es notorio que el parámetro Sólidos Sedimentables presenta una muy buena eficiencia (superior al 90%) durante la primera semana de operación, cayendo casi a la mitad al final de la segunda semana. Esto coincide con la observación visual del estado del sistema (ver Figura 4), y permite concluir que en este caso, el parámetro Sólidos Sedimentables refleja adecuadamente el estado del estercolero y su eficiencia. Este hecho tiene relación con que el mecanismo principal de separación sólido – líquido que opera en el estercolero es precisamente la sedimentación.

4.2.2. Caso 2 – Prensa extrusora de eje inclinado 1

Para hacer el balance de masa en el sistema se considera como entrada, la entrada neta a la prensa, es decir, la corriente que es enviada a la prensa menos la corriente que retorna al punto de bombeo. Es de destacar que en todo momento estas corrientes tienen concentraciones iguales. La corriente de salida es la suma de: la corriente de líquidos, el sólido separado y el escurrido.

En la Tabla 9 se presenta el balance de masa en el sistema del Caso 2 para los diferentes parámetros. Durante el período de funcionamiento de la prensa ingresaron a la misma 671 kg de sólidos y salieron] a través de las tres corrientes identificadas como salida 664 kg de sólidos. Esto implica que en la cuantificación de las corrientes se constata una diferencia de ajuste del balance de 1 % (6.4 kg de sólidos) entre la entrada y la salida. Considerando la incertidumbre asociada a los muestreos y determinaciones propios de los métodos utilizados, este valor es aceptable. En cuanto a los demás parámetros, los valores de falta de ajuste en los balances fueron aceptables en todos los casos. El mayor apartamiento correspondió a los Sólidos Suspendidos Totales, con un valore menor al 10%.

Tabla 9. Balance de masa en el sistema del Caso 2 para los diferentes parámetros

	Sólidos Totales	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Sólidos Suspendidos Totales
Entrada neta a la prensa (Entrada – Retorno) (kg)	671	22,6	4,18	15,58	492,5
Suma de Corrientes de salida (Salida líquida + Sólidos separados+ escurrido) (kg)	664	22,37	4,00	15,63	446,7
Diferencia de balance (kg)	6,4	0,3	0,2	0,0	45,8
Diferencia (%)	1,0%	1,1%	4,4%	-0,3%	9,3%

Teniendo en cuenta que los resultados del balance fueron aceptables, se calcularon las eficiencias que se presentan en la Tabla 10 y en la Figura 20.

Tabla10. Caso 2 - Índice de separación y eficiencia de remoción para diferentes parámetros

Parámetro	Índice de separación (en masa)	Eficiencia de Remoción (en concentración)
Sólidos Totales	17%	18%
Nitrógeno	9%	10%
Fósforo	5%	10%
Potasio	2%	2%
Sólidos Suspendidos Totales	20%	29%

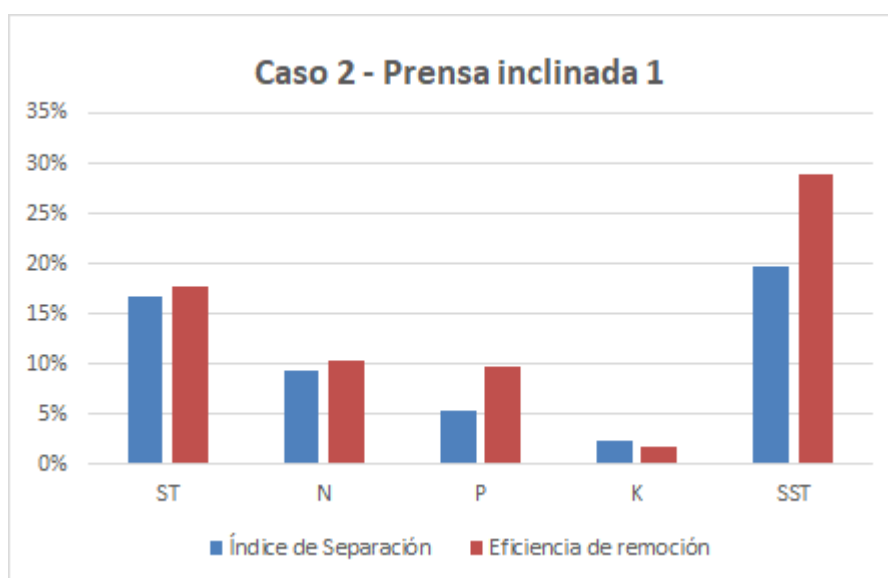


Figura 20. Evaluación de eficiencias del Caso 2

En el caso de la Prensa inclinada 1 existió una mayor diferencia entre la eficiencia de separación de Sólidos Totales (17-18%) respecto de la separación de Sólidos Suspendidos Totales (29%). Esto es esperable, ya que el equipo está diseñado justamente para efectuar una separación física de los sólidos en base al tamaño retenido por la malla de la prensa. Por la misma causa, la eficiencia en la remoción de Potasio fue baja, ya que el Potasio se encuentra principalmente en solución.

4.2.3. Caso 3 – Prensa extrusora de eje inclinado 2

Este caso se trata de un tambo robotizado con pocos animales y bajos tiempos de permanencia de los animales en el área de ordeño, por lo que las concentraciones y masas de los parámetros considerados son significativamente menores respecto a los demás sistemas evaluados.

Los balances de masa presentan apartamientos menores en el caso de los parámetros Sólidos Totales, Sólidos Suspendidos y Potasio. Para los parámetros Fósforo y Nitrógeno el apartamiento es algo mayor (máximo 10%), pero de todas maneras se considera aceptable.

Tabla 11. Balance de masa en el sistema del Caso 3 para los diferentes parámetros

	Sólidos Totales	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Sólidos Suspendidos Totales
Entrada neta a la prensa (Entrada) (kg)	50,5	2,4	0,41	1,40	29,4
Suma de Corrientes de salida (Salida líquida + Sólidos separados) (kg)	49,4	2,2	0,38	1,37	29,2
Diferencia de balance (kg)	1,1	0,2	0,03	0,03	0,2
Diferencia (%)	2,3%	10%	6%	2,3%	0,7%

Las eficiencias de separación son similares a las obtenidas con el equipo anterior. Se destaca la eficiencia de separación en Sólidos Suspendidos Totales.

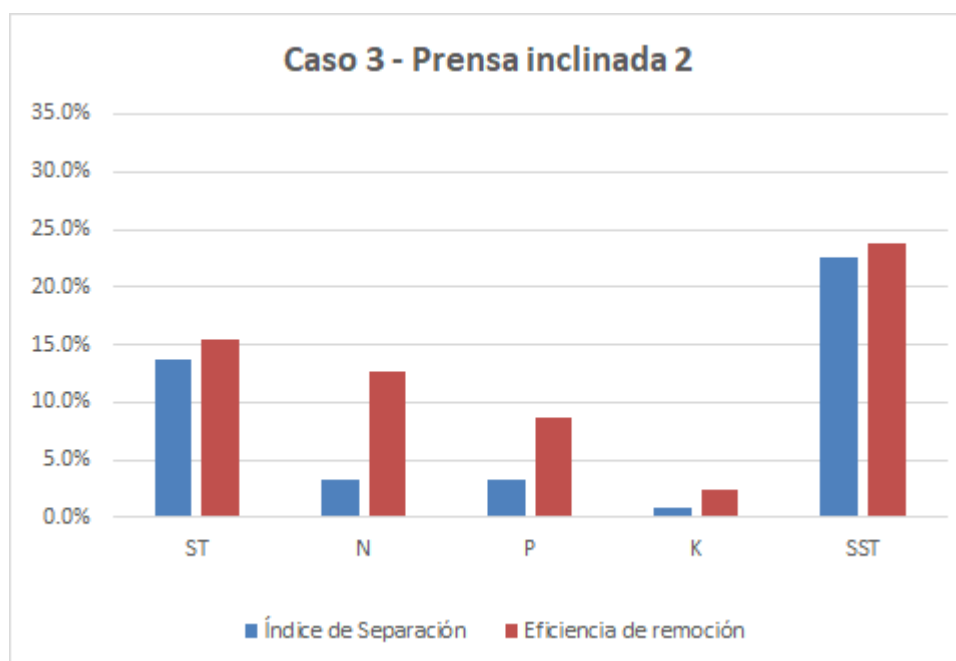


Figura 21. Evaluación de eficiencias del Caso 3

Tabla12. Caso 3 - Índice de separación y eficiencia de remoción para diferentes parámetros

Parámetro	Índice de separación (en masa)	Eficiencia de Remoción (en concentración)
Sólidos Totales	13,7%	15,5%
Nitrógeno	3,3%	12,6%
Fósforo	3,3%	8,6%
Potasio	0,8%	2,5%
Sólidos Suspendedos Totales	22,6%	23,8%

4.2.4. Caso 4 - Prensa extrusora de eje horizontal

Los balances de masa (ver Tabla 13) presentan apartamientos menores en el caso de los parámetros Sólidos Totales, Nitrógeno, Fósforo y Potasio. Para los Sólidos Suspendedos Totales el apartamiento es algo mayor, pero se considera aceptable (menor al 10%).

Tabla 13. Balance de masa en el sistema del Caso 4 para los diferentes parámetros

	Sólidos Totales	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Sólidos Suspendedos Totales
Entrada neta a la prensa (Entrada) (kg)	663	30,3	5,1	34,0	392,7
Suma de Corrientes de salida (Salida líquida + Sólidos separados) (kg)	656	29,2	4,9	33,9	355,8
Diferencia de balance (kg)	7	1,1	0,2	0,1	36,9
Diferencia (%)	1%	4%	4%	0,2%	9,4%

Tabla14. Caso 4 - Índice de separación y eficiencia de remoción para diferentes parámetros

Parámetro	Índice de separación (en masa)	Eficiencia de Remoción (en concentración)
Sólidos Totales	8,2%	8,8%
Nitrógeno	1,8%	5,4%
Fósforo	1,4%	5,0%
Potasio	0,5%	0,3%
Sólidos Suspendidos Totales	13,2%	9,1%

Las eficiencias de separación son menores a las obtenidas con las prensas de eje inclinado (Casos 2 y 3).

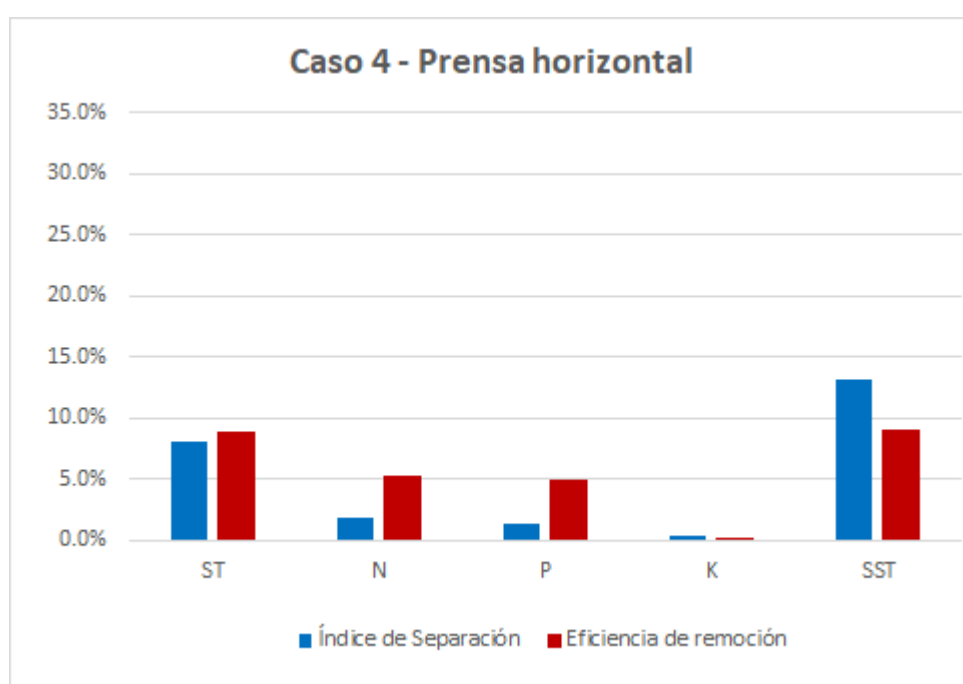


Figura 22. Evaluación de eficiencias del Caso 4

4.2.5. Caso 5 - Tamiz

En el caso del tamiz los balances de masa presentan diferencias de ajuste entre entrada y salidas que son admisibles en todos los parámetros. Los valores se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Balance de masa en el sistema del Caso 5 para los diferentes parámetros

	Sólidos Totales	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Sólidos Suspendidos Totales
Entrada neta a la prensa (Entrada) (kg)	190	9,1	1,4	4,3	144,5
Suma de Corrientes de salida (Salida líquida +Ecurrido+ Sólidos separados) (kg)	185	8,6	1,3	4,2	144,2
Diferencia de balance (kg)	5	0,5	0,1	0,1	0,3
Diferencia (%)	3%	6%	7%	2%	0,2%

Las eficiencias de separación para el caso del tamiz son del orden de (intermedias entre) los valores de eficiencia de las prensas de eje inclinado y la de eje horizontal. Los resultados se presentan en la Tabla 16 y la Figura 23.

Tabla16. Caso 5 - Índice de separación y eficiencia de remoción para diferentes parámetros

Parámetro	Índice de separación (en masa)	Eficiencia de Remoción (en concentración)
Sólidos Totales	17%	11%
Nitrógeno	3%	6%
Fósforo	3%	7%
Potasio	1%	1%
Sólidos Suspendidos Totales	14%	13%

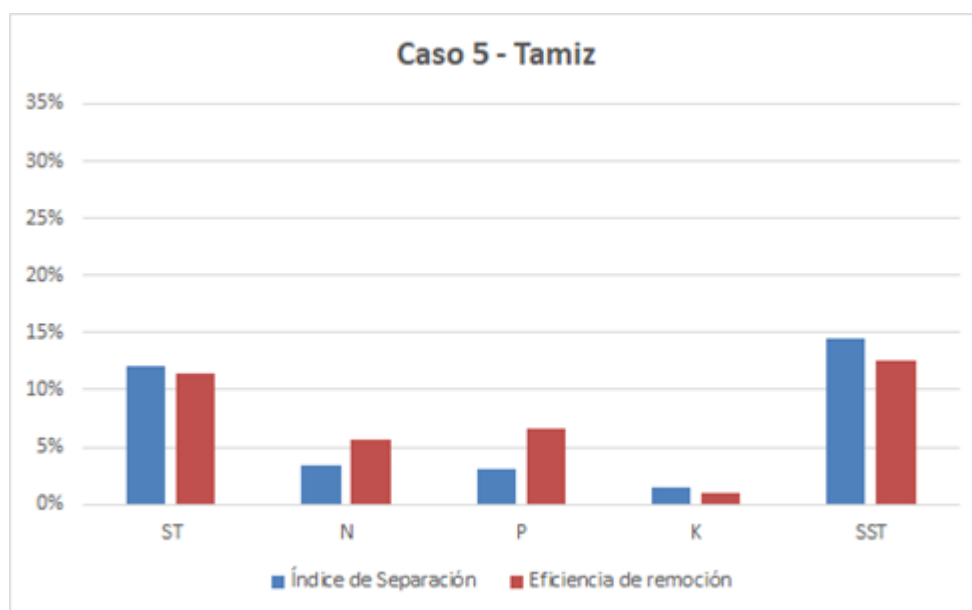


Figura 23. Evaluación de eficiencias del Caso 5

4.3. Comparación de casos

En la Tabla 17 se resumen las eficiencias (expresadas como Índices de Separación) de los distintos parámetros, para cada uno de los separadores, calculadas en base a resultados de los balances de masa de los sistemas.

Tabla 17. Índices de separación de los diferentes parámetros para cada uno de los casos estudiados.

Tipo de separador	Sólidos Sedimentables	Sólidos Totales	Sólidos Suspendidos Totales	Potasio	Fósforo	Nitrógeno
Caso 1 - Estercolero	73%	35%	43%	3%	8%	12%
Caso 2 – Prensa inclinada 1	28%	17%	30%	2%	5%	9%
Caso 3 – Prensa inclinada 2	22%	14%	24%	1%	3%	3%
Caso 4 – Prensa horizontal	36%	8%	9%	1%	1%	2%
Caso 5 - Tamiz	0%	12%	13%	1%	3%	3%

Las eficiencias calculadas con el parámetro Sólidos Sedimentables resultaron sustancialmente diferentes a las correspondientes a las calculadas con otros parámetros de “Sólidos” en el efluente, como ser los Sólidos Totales o los Sólidos Suspendidos Totales. En el caso de los Sólidos Sedimentables, presentado en la Figura 24, además de una variación importante entre equipos, se detectaron también diferencias importantes respecto al caso de usar los otros parámetros de Sólidos que fueron considerados. Como ya se indicó previamente, los Sólidos Sedimentables son un parámetro que refleja muy bien el comportamiento del Caso 1 (Estercolero), en el cual el mecanismo principal de separación sólido – líquido es justamente la sedimentación.

En el Caso 5 - Tamiz, la eficiencia en Sólidos Sedimentables resultó ser nula, a pesar de que era observable que el equipo estaba separando material sólido en su malla filtrante. Debe recordarse que el dato de Sólidos Sedimentables expresa el volumen (y no la masa) de sólidos que sedimentaron al cabo de un cierto tiempo (habitualmente 1 hora). Por lo tanto, una eficiencia nula de separación de Sólidos Sedimentables indica simplemente que los sólidos sedimentados al cabo de 1 hora en el líquido de entrada y de salida ocupan el mismo volumen. Pero esto no significa que posean la misma masa. Podría ocurrir por ejemplo, que la bomba de impulsión al tamiz (que cuenta con un sistema de trituración), produjera una reducción del tamaño de los sólidos a la salida del tamiz, y por lo tanto de su velocidad de sedimentación. Sería eventualmente posible observar volúmenes similares de Sólidos Sedimentables al cabo de 1 hora en los líquidos de entrada y de salida, pero que corresponderían a masas diferentes de sólidos. Nótese que si calculan los Índices de Separación en base a parámetros másicos, como ser los Sólidos Totales o los Sólidos Suspendidos Totales, efectivamente se obtienen eficiencias diferentes de cero para el Tamiz.

Por esta razón se entiende que los Sólidos Sedimentables no son un parámetro adecuado en todos los casos para evaluar el funcionamiento de los separadores mecánicos. Esto remarca la importancia de definir con precisión el parámetro con el cual se expresan las eficiencias de los equipos al momento de brindar sus características técnicas. Para los separadores mecánicos se considera más apropiado el uso, con fines comparativos, de las eficiencias calculadas en base a un parámetro relacionado con la separación por tamaño, como son los Sólidos Suspendidos Totales.



Figura 24. Comparación de eficiencias en Sólidos Sedimentables para los distintos casos

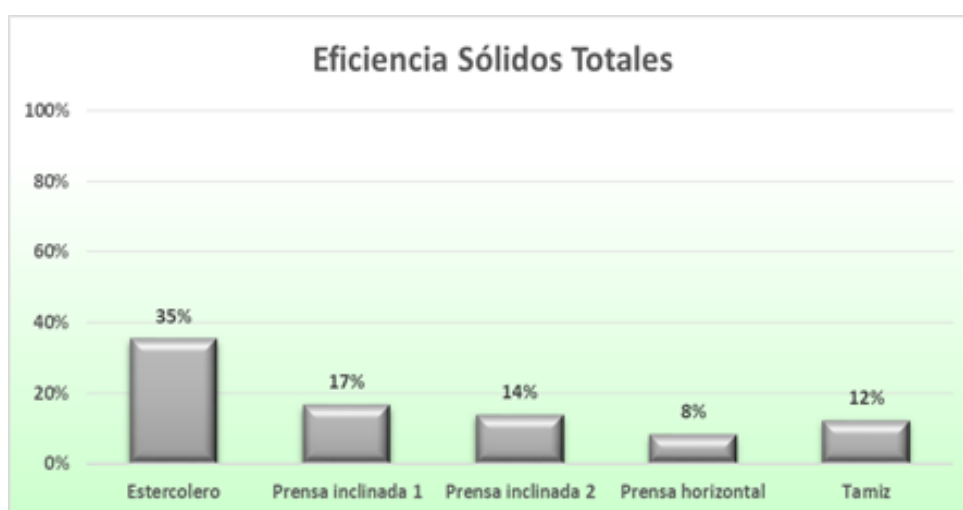


Figura 35. Comparación de eficiencias en Sólidos Totales para los distintos casos



Figura 46. Comparación de eficiencias en Sólidos Suspendidos Totales para los distintos casos

En relación a los demás parámetros, se observa que los nutrientes acompañan en líneas generales al comportamiento de los Sólidos Suspendidos Totales, como puede verse en las Figuras 27 a 29. Las eficiencias son comparativamente bajas en estos casos, lo cual sugiere que los nutrientes se encuentran asociados mayoritariamente a la fase líquida del efluente. Esto es particularmente notorio para el caso del Potasio.

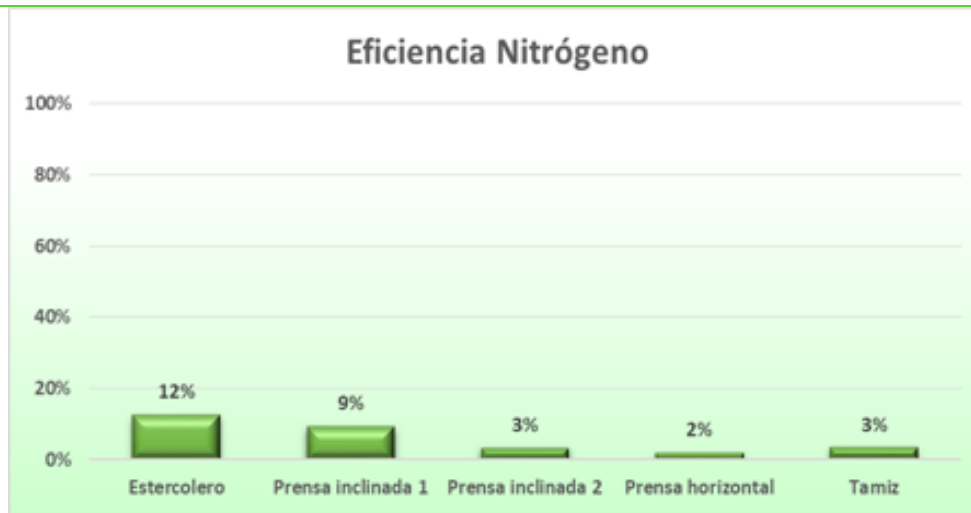


Figura 57. Comparación de eficiencias en Nitrógeno para los distintos casos

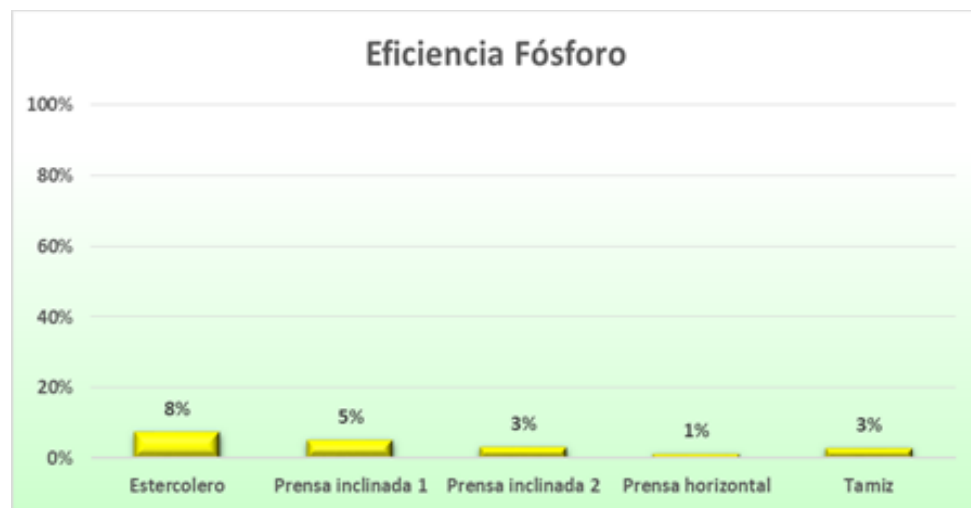


Figura 68. Comparación de eficiencias en Fósforo para los distintos casos

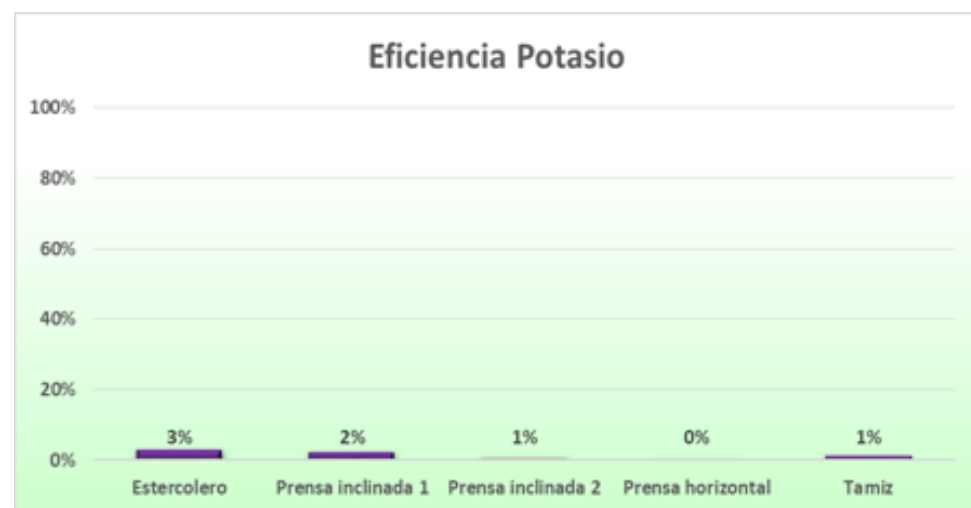


Figura 78. Comparación de eficiencias en Potasio para los distintos casos

Es importante dejar sentado que muy probablemente existen sesgos en los valores de eficiencias aquí presentadas para los distintos sistemas, ya que los ensayos no se hicieron con todos los equipos en el mismo tambo, ni con el mismo efluente, ni en el mismo momento. Por lo tanto, pueden existir diferencias en la distribución de tamaños de partículas sólidas del efluente procesado en cada caso, que pueden estar incidiendo en los valores observados de eficiencias.

En este sentido, aparece como relevante evaluar la distribución de los sólidos por tamaño de partícula para cada efluente bruto, y la eficiencia de separación por rango de tamaño de partícula.

4.3.1. Distribución de tamaños de partícula de los Sólidos Suspendidos

Se analizaron las distribuciones de tamaños de partícula en el efluente que ingresó a cada sistema de separación, de acuerdo a los criterios establecidos en las metodologías de análisis (numeral 3.3.1). A partir de los resultados de análisis se obtuvieron las distribuciones presentadas en el gráfico de la Figura 29.

En todas las distribuciones la fracción de los Sólidos Suspendidos Totales presentes en el efluente que resulta más abundante, corresponde a los “sólidos medianos” (Fracción entre 0,5 mm y 8 μ m). Los “sólidos grandes” (fracción mayor a 0,5 mm) y los “Sólidos chicos” (fracción entre 1,2 y 8 μ m) presentan porcentajes comparativamente menores. Se observan algunos casos con diferencias notorias, como el Caso 4 con bajo porcentaje de sólidos grandes, y el Caso 5 con bajo porcentaje de sólidos chicos. Teniendo en cuenta que los equipos mecánicos separan los sólidos en base fundamentalmente a una selección por tamaños, esperable que estas diferencias de distribución incidan en las eficiencias de separación esperables en cada caso.

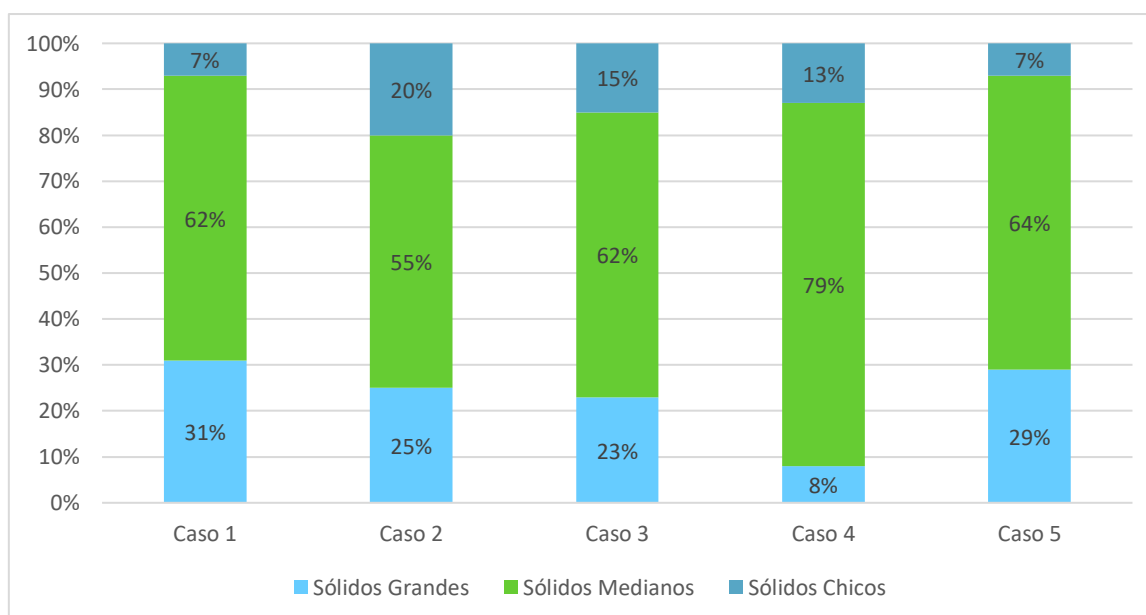


Figura 29. Porcentajes de distribución de los tamaños de partícula de los SST para los diferentes casos

4.3.2. Eficiencias de remoción según tamaño de sólidos

En la Tabla 18 se calculan las eficiencias de remoción de las distintas fracciones de sólidos presentes en los efluentes de los diferentes casos. Los datos se calcularon en base a la metodología indicada en 3.3.1, consistente en fraccionamiento en laboratorio de los SST por rango de tamaño (mediante cribado o filtración del líquido de entrada y de salida), y posterior análisis individual de cada fracción separada.

Tabla 18. Eficiencias de remoción de SST por rango de tamaño para los distintos casos evaluados

	Eficiencias de separación de SST por rango de tamaño		
	Sólidos grandes	Sólidos medianos	Sólidos chicos
Caso 1 - Estercolero	82%	26%	2%
Caso 2 - Prensa inclinada 1	91%	10%	7%
Caso 3 - Prensa inclinada 2	80%	7%	8%
Caso 4 - Prensa horizontal	83%	3%	0%
Caso 5 - Tamiz	57%	-11%	54%

Los resultados se presentan gráficamente a continuación, comparando las eficiencias obtenidas para los distintos equipos, según el rango de tamaño de partícula (Figuras 30 a 32).

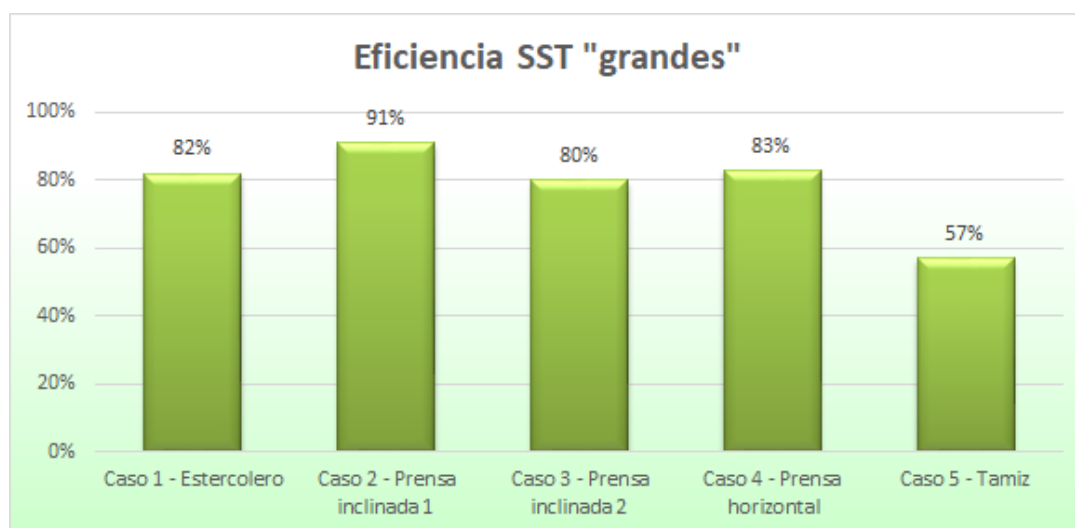


Figura 30. Eficiencia de remoción de SST mayores a 0,5 mm para los diferentes casos

En la Figura 30 se puede ver que las eficiencias de remoción de sólidos grandes para las prensas extrusoras son similares (o aún mayores) a la eficiencia del estercolero. En el caso del tamiz se obtuvo una eficiencia importante, aunque menor al resto de los equipos. Como ya se indicó previamente, en el caso del tamiz se observaron algunos resultados anómalos, que se apartan de la tendencia de los otros casos, y que merecerían una investigación más detallada, que no pudo realizarse en el marco de esta consultoría.

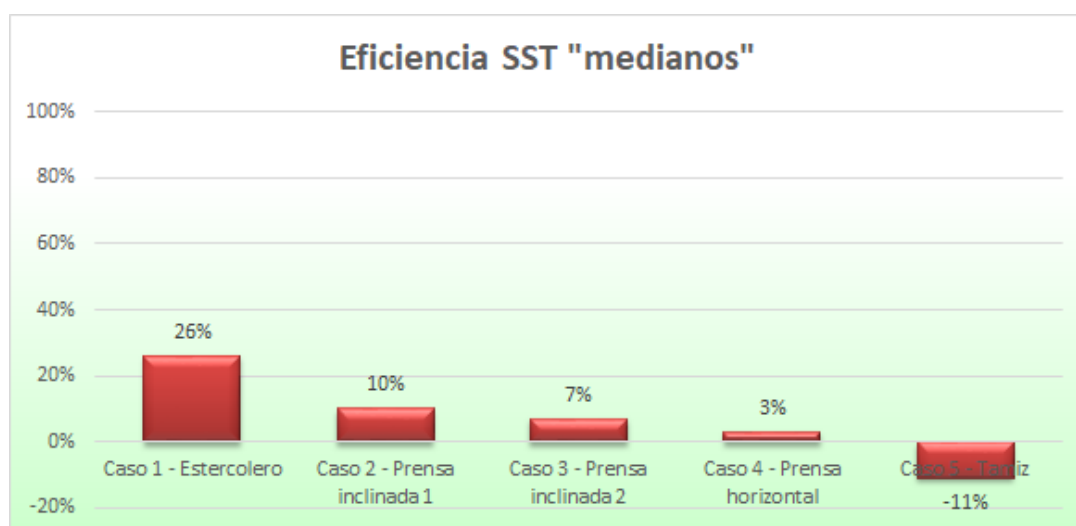


Figura 31. Eficiencia de remoción de SST entre 0,5 mm y 8 μ m para los diferentes casos

En la Figura 31 se puede ver que el estercolero tiene una eficiencia de remoción significativa para la fracción de SST medianos. Esto era en cierto modo esperable, ya que esa fracción de sólidos presenta velocidades de sedimentación que permiten su separación gravitatoria en un estercolero. Como contrapartida, su rango de tamaño es inferior a las dimensiones de los orificios o aberturas de las mallas de las prensas o tamices, por lo cual era esperable obtener bajas eficiencias de remoción en esos equipos para este rango de tamaño. Nuevamente, se presenta un resultado inesperado para el caso del tamiz, con una concentración mayor de sólidos de este rango a la salida que en el efluente bruto. Este hecho dio lugar a la hipótesis ya expresada, de que puede existir un efecto de trituración en la bomba de alimentación, que haga aumentar la cantidad de sólidos “medianos” como resultado de la trituración de sólidos de mayor tamaño. Si esos sólidos de tamaño mediano no fueran retenidos en el tamiz, se podría observar un aumento de su concentración a la salida, en comparación con su concentración en el efluente bruto previo al bombeo.

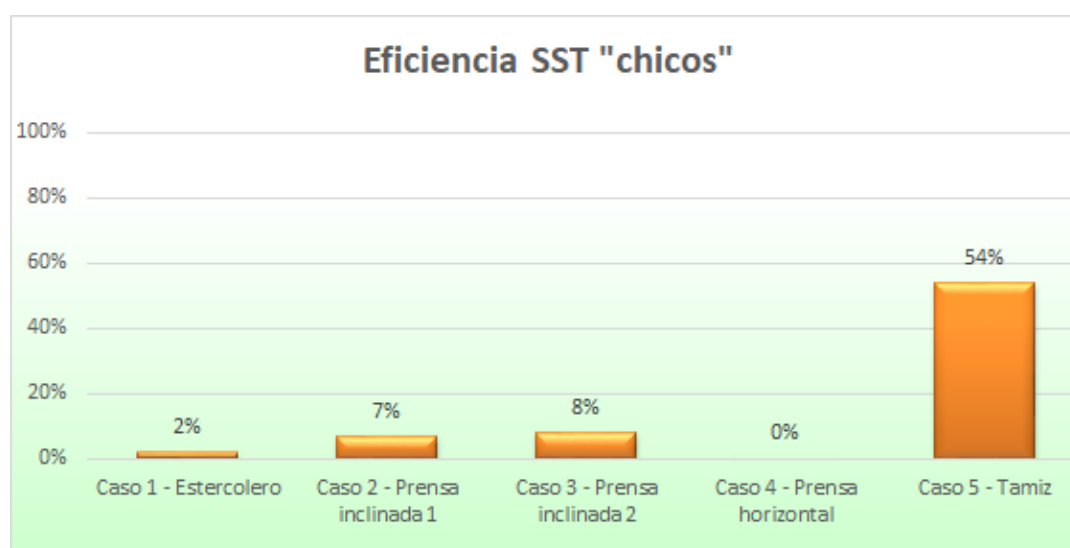


Figura 32. Eficiencia de remoción de SST entre 8 μ m y 1,2 μ m para los diferentes casos

En la Figura 32 se observa que las eficiencias de remoción de los sólidos de menor tamaño son muy bajas, como era de esperarse. Con la excepción, una vez, de un comportamiento diferente en el caso de tamiz. No se pudo determinar ninguna hipótesis explicativa para ese comportamiento, por lo cual sería necesario repetir estos ensayos, a los efectos de verificar o no los resultados para ese equipo.

4.4. Caracterización de los materiales sólidos separados en los equipos

Los resultados de los análisis del material sólido extraído por cada sistema separador se presentan en la Tabla 19. Los resultados indican que el sólido más seco fue obtenido en el Caso 4, que se trata de una prensa de eje horizontal. Una menor humedad en el material separado (mayor porcentaje de sólidos totales) facilita las tareas de aplicación, ya que el material es de manipulación más simple, y disminuyen los volúmenes (y pesos) a gestionar.

El residuo más húmedo en cambio correspondió al Caso 1 (estercolero). El valor reportado corresponde a una muestra extraída en el momento de la limpieza. Cabe señalar que en este caso es imprescindible (y está previsto) un escurrimiento del material semisólido retirado del sistema, que permite alcanzar menores contenidos de humedad a medida que se lo deja secar. Esta etapa de secado es de duración muy variable, dependiendo fuertemente de las condiciones climáticas, y requiere de un área impermeable importante para depositar el material.

Tabla 19. Caracterización de los sólidos generados en diferentes tipos de separadores

Sistema	Sólidos Totales (%)	Sólidos Volátiles (% bs)	Nitrógeno (% N b.s.)	Fósforo (% P b.s.)	Potasio (% ST)
Caso 1	10,0	71,3	2,44	0,21	0,28
Caso 2	16,1	85,8	1,89	0,20	0,33
Caso 3	13,7	87,5	1,14	0,20	0,16
Caso 4	24,0	79,3	1,04	0,14	0,30
Caso 5	12,8	89,6	1,32	0,16	0,27
Promedio separadores mecánicos	16,6	85,6	1,35	0,18	0,27
Promedio todos los separadores	15,3	82,7	1,57	0,19	0,27
Caracterización de Del Pino et al (1)	20,0	81,0	1,14	0,19	0,25

(1) Del Pino, et al.(2019) Caracterización de residuos agroindustriales como potenciales mejoradores de suelo

En todos los casos, los sólidos recuperados presentaron porcentajes no despreciables de Nitrógeno y Fósforo, lo cual justifica su posible aplicación al terreno en un esquema de reciclado de nutrientes.

Se comparan a continuación las propiedades de los sólidos obtenidos en los diferentes sistemas con los requisitos establecidos en la Pauta Técnica para “Mejoradores de suelo - Alternativa A” elaborada por DINAMA (2015). La comparación se hace en los siguientes parámetros:

- Sólidos Totales (debe ser mayor o igual a 50% base húmeda)
- Relación Carbono / Nitrógeno (debe ser menor a 20)
- Materia orgánica (debe ser mayor a 20% en base seca)
- Suma de N, P y K (debe ser mayor a 1,5%)

Sólidos Totales - El contenido en Sólidos totales de los materiales sólidos separados en los sistemas no alcanza el mínimo contenido requerido 50 %. Para alcanzar estos niveles de contenidos de sólidos se requiere al menos dejar estacionar los residuos en pilas para su secado.

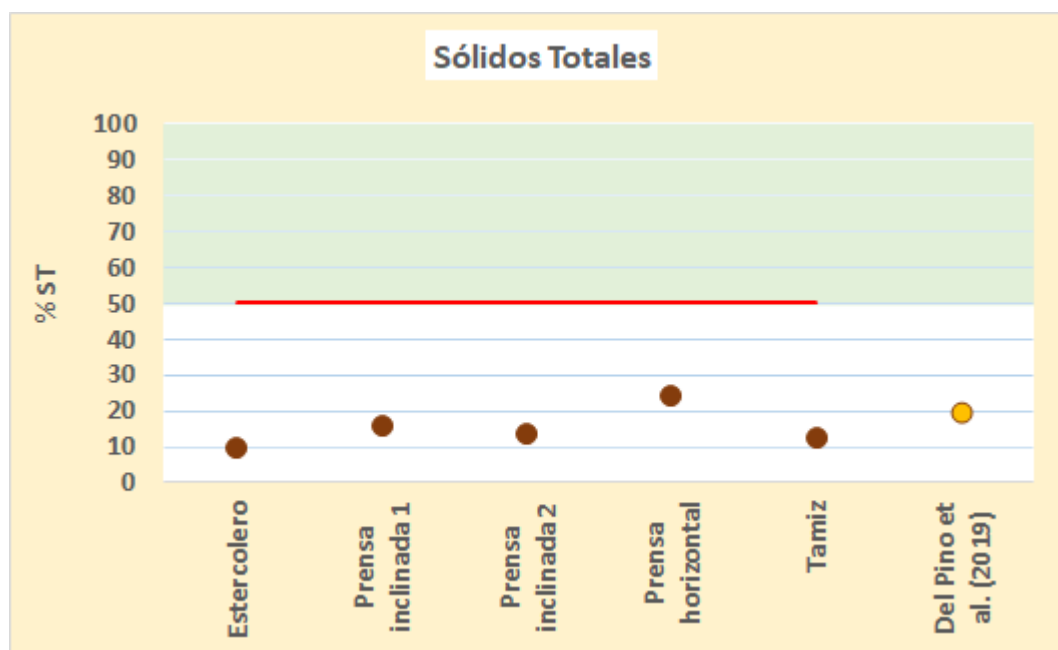


Figura 33. Comparativa del contenido en ST de los sólidos separados

Relación C/N - La relación C/N de los residuos separados es en casi todos los casos mayor a 20, indicando que los materiales no están estabilizados. Una excepción es el Caso 1 (estercolero), en que se alcanza la relación requerida. Como hipótesis, esto se atribuye al tiempo de permanencia del sólido de por lo menos 15 días dentro del estercolero, lo que podría permitir un inicio de procesos de estabilización microbiológica.

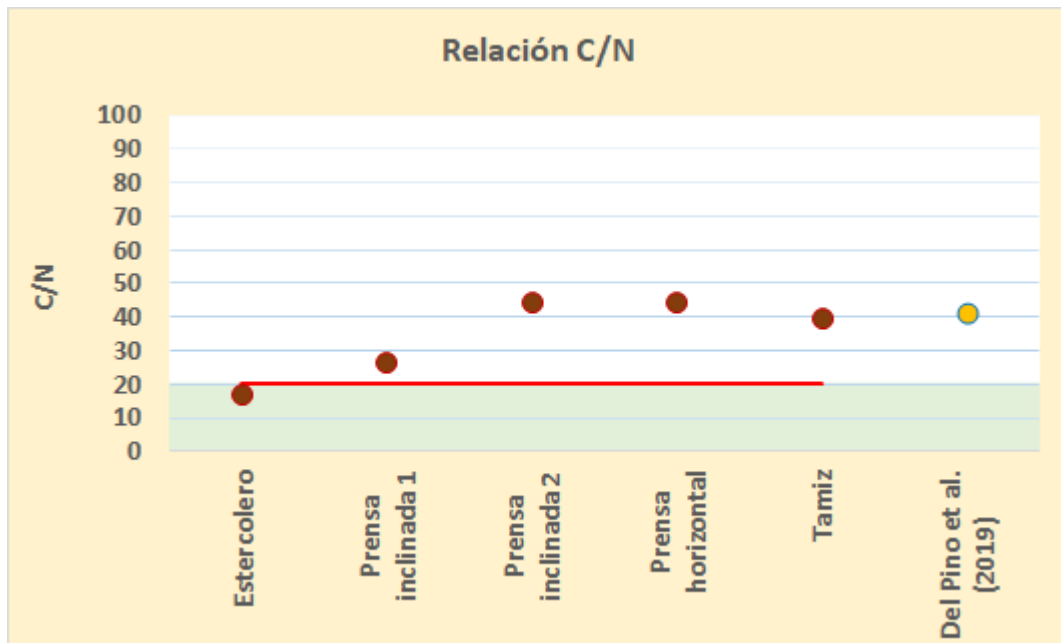


Figura 34. Comparativa de la relación C/N para los diferentes residuos respecto a los mejoradores de Suelos

Materia orgánica – El parámetro Materia Orgánica en los sólidos separados no fue medido, pero sí se determinó el valor de Sólidos Volátiles. En una primera aproximación se puede asumir que los SV son una representación aceptable de los valores de Materia Orgánica. Con esa salvedad, se puede afirmar que los materiales evaluados tendrían porcentajes de materia orgánica muy superiores al límite mínimo de 20% establecido en la Pauta.

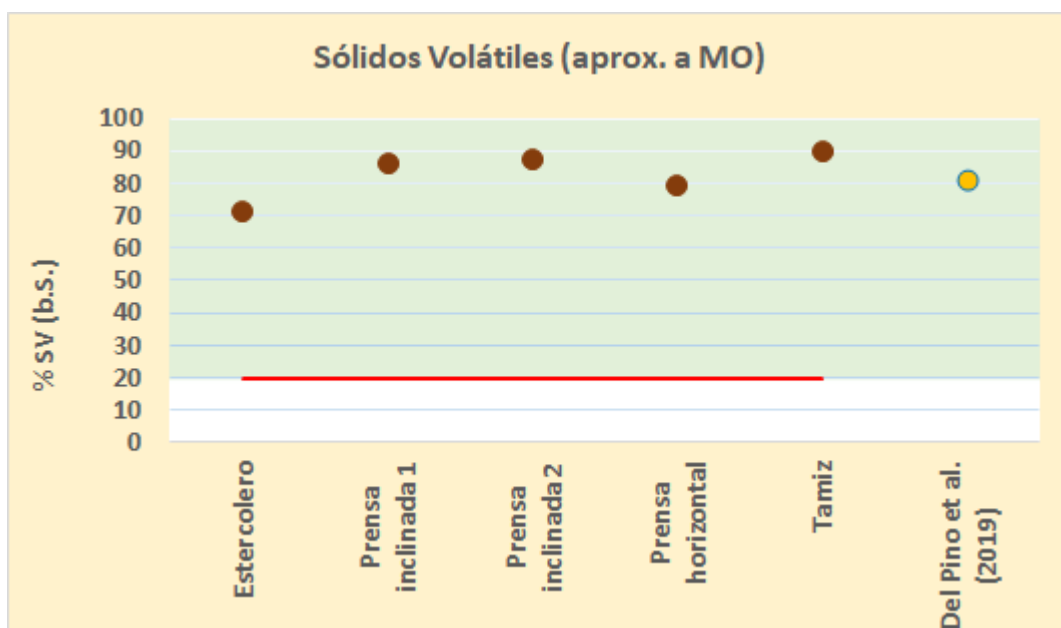


Figura 35. Comparativa del contenido en SV de los sólidos separados

Suma de N,P,K – Este parámetro cumple con el requisito de la Pauta, en algunos casos más holgadamente que en otros en que se está en el límite pautado

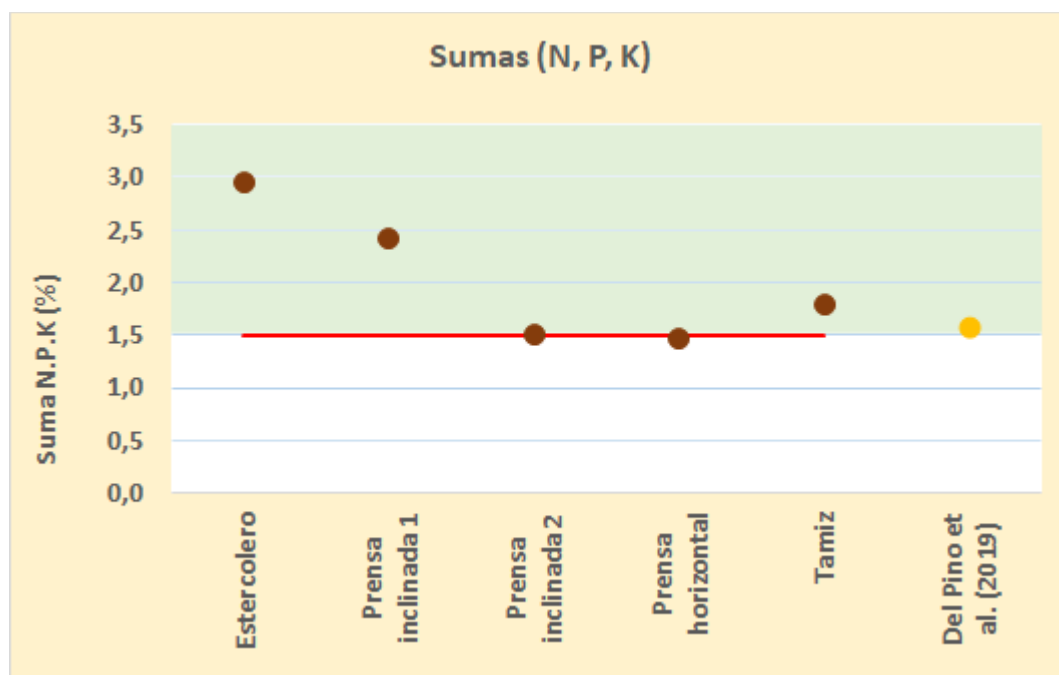


Figura 36. Comparativa de la suma de N,P, K para los diferentes residuos respecto a los mejoradores de Suelos

Como conclusión general de este punto, puede afirmarse que si bien los materiales evaluados no cumplen con todos los criterios considerados, es esperable que puedan cumplirlos una vez sometidos a procesos de estabilización (secado en pilas, compostado), que permitan hacer disminuir la humedad y la relación C/N.

4.5. Costos operativos

Se realizó una evaluación de los costos operativos asociados a la gestión global de los sólidos. Esto incluye factores tales como:

- Energía eléctrica de bombeo y agitación para la alimentación de efluente bruto a los separadores (cuando aplica)
- Energía eléctrica para accionamiento de los separadores (en el caso de las prensas extrusoras)
- Consumo de combustible para movimiento de los sólidos separados (incluye limpieza de la unidad en el caso del estercolero)
- Horas hombre asociadas directamente a la operación de los separadores de sólidos (limpieza de estercolero, apilado de sólidos en los demás casos).
- Costos asociados a la aplicación al terreno de los sólidos separados en los equipos.
- Costo de agitación y bombeo para aplicación de líquido de la pileta de acumulación. (Este costo se incluye ya que existen sistemas que incorporan potencia elevada de agitación de las piletas para evitar que sedimenten allí los sólidos de tamaño medio que no pudieron ser separados previamente en los separadores. Al agitar el contenido de las piletas, esos sólidos se re-suspenden, y son aplicado a campo conjuntamente con el líquido que se bombea).
- Costo de limpiezas periódicas de las piletas de acumulación, para retirar los sólidos que no pudieron ser separados por los equipos y, a pesar de la agitación, igualmente sedimentaron en la pileta.

En la Figura 37 se muestran los costos anuales operativos, incluyendo sus componentes, para la gestión de los sólidos utilizando los diferentes sistemas de separación evaluados. A los efectos de dar validez a la comparación, los valores de los costos se prorrataron en todos los casos para un tambo de 190 vacas en ordeño.

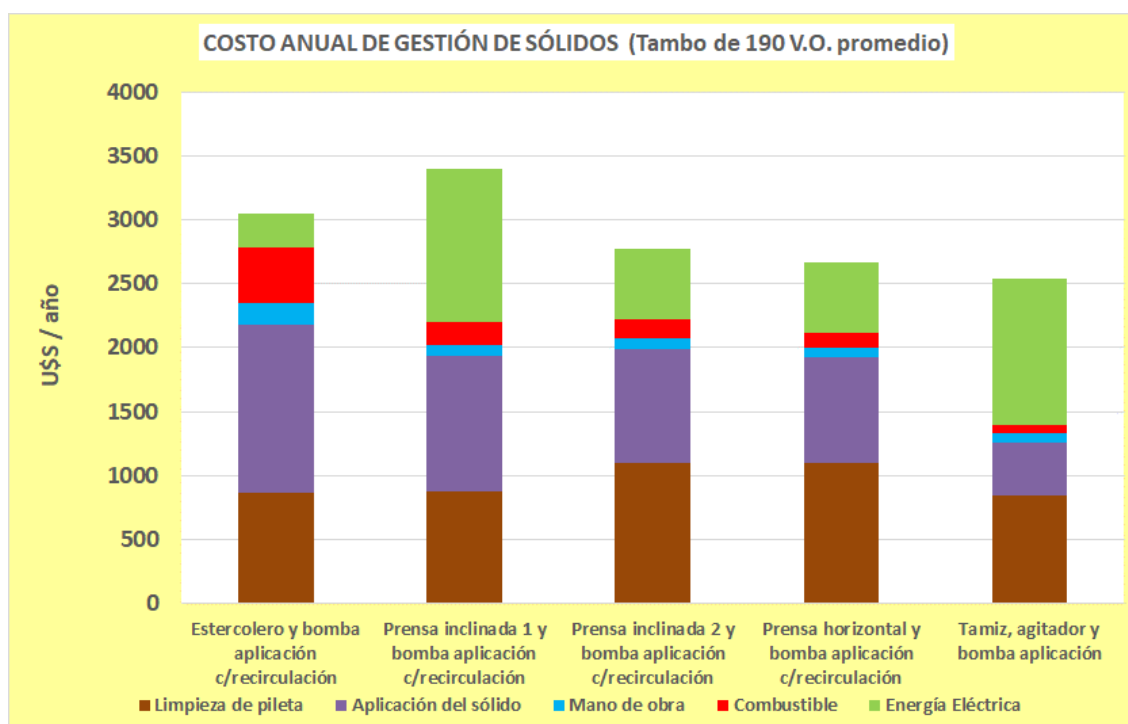


Figura 37. Comparación de costos anuales de gestión de sólidos para los distintos casos evaluados (llevados a una base común de un tambo de 190 VO)

La gráfica anterior merece algunos comentarios:

- El Caso 2 presenta un elevado consumo de energía eléctrica si se lo compara con otros casos (en particular, con el Caso 3 que corresponde a un equipo similar pero más nuevo). El elevado consumo eléctrico del Caso 2 estuvo asociado al consumo de la bomba de alimentación al equipo, debido a que la distancia entre el pozo de bombeo y la prensa extrusora era mucho mayor que en otros casos, y además la tubería de impulsión era de un diámetro menor al recomendable. Este hecho remarca la importancia de que el diseño del sistema de gestión de efluentes (y en particular, la separación de sólidos) se realice con una visión integral de todos sus componentes en forma armónica.
- El Caso 5 también presentó un importante consumo de energía eléctrica en comparación con otros casos. Esto se atribuye a que el sistema fue pensado para aplicar energía en la trituración de los sólidos en el pozo de bombeo, separar los sólidos mayores en el tamiz, y luego aplicar potencia de agitación en la pileta para evitar la sedimentación de los sólidos, y poder bombearlos para su aplicación a campo conjuntamente con el líquido. Como contrapartida, este diseño del sistema permitió disminuir el costo de aplicación de sólidos extraídos en el tamiz (fue el equipo de menor eficiencia de separación de sólidos grandes) y disminuir el costo de limpieza de piletas (menor velocidad de colmatación por mayor agitación y extracción por bombeo). El resultado neto fue que el costo global de operación es similar al de los otros sistemas mecánicos instalados correctamente (Casos 3 y 4)
- El costo del Caso 1 resulta comparativamente mayor, debido a los componentes de costo asociados a la limpieza del estercolero (hora hombre, combustible, mayor volumen de sólidos a mover y distribuir).
- Más allá de todos los comentarios anteriores, los valores absolutos de la gráfica de la Figura 37 deben considerarse como meramente indicativos, debido a que existen incertidumbres asociadas a la determinación de las distintas componentes de los costos. Pero se remarca la importancia de tener en cuenta todos los factores de costo asociados a la gestión de sólidos al momento de tomar la decisión de elegir entre uno u otro sistema. En particular, el considerar en la decisión solamente alguno de los factores de costo (por ejemplo, consumo de energía eléctrica) puede llevar a tomar decisiones inadecuadas, como ejemplifica el Caso 5.

5. Conclusiones

Se resumen a continuación las principales conclusiones de la consultoría:

- Pudo verificar que los diferentes equipos **operan según diferentes mecanismos de separación de sólidos**, y esto afecta las eficiencias de separación de las diferentes fracciones de tamaño de sólido presentes en el efluente bruto.
- Se propone el uso del parámetro **Sólidos Suspendidos Totales** para describir el funcionamiento de los separadores. Para hacer comparaciones certeras e insesgadas, se recomienda asociarlo a la distribución de tamaños de partícula.
- Todos los separadores evaluados mostraron **buenas eficiencias de separación de los sólidos suspendidos de mayor tamaño** presentes en el líquido, y mostraron resultados variables para los sólidos intermedios y menores.
- Los **sistemas mecánicos** permiten recuperar un material **sólido de menor humedad** y de manipulación más simple que el de un estercolero.
- En todos los casos evaluados, los sólidos recuperados presentaron **propiedades químicas (y en especial, concentraciones de N,P,K)** alineadas con el concepto de “mejorador de suelos”.
- Los **costos operativos** de los distintos separadores evaluados resultaron similares, aunque la distribución de los componentes del costo es muy diferente. Al momento de seleccionar un sistema de separación, debe tenerse en cuenta la **distribución de componentes de costos apropiada a las características del tambo**.
- Al momento de seleccionar un separador de sólidos para un tambo, la distribución de los componentes del costo permite detectar **oportunidades** (p.ej. si ya se cuenta con equipo de distribución de sólidos, esa componente del costo puede ser menor) y **restricciones** (p.ej. si hay limitación en la potencia eléctrica contratada).
- Además del costo, en cada caso deben considerarse las **inversiones** (tema no abordado en este trabajo).
- Se remarca la importancia de un **diseño adecuado del sistema de separación en su conjunto**. Errores de diseño pueden llevar a costos ocultos (p.ej. costos de bombeo excesivos)

6. Bibliografía

APHA, AWWA, WEF (2005) Standard Methods for the examination of water and wastewater. EE.UU de A. ISBN 0-87553-047-8

Del Pino, A.; Takata, V.; Casanova, O.; González, M.J.; Benzano, Florencia. (2019) *Caracterización de residuos agroindustriales como potenciales mejoradores de suelo*. XXII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Montevideo, Uruguay, 7 – 11 de octubre 2019.

DINAMA (2015) Pauta técnica para el uso de residuos como mejoradores de suelo -Versión borrador. Abril 2015

Ford, M. Fleming, R. (2002) Mechanical Solid-Liquid Separation of Livestock Manure. Literature Review. Ridgeway College, University of Guelph, Ontario, Canada.

Gutiérrez, S., Cabrera, N. (2004) Estimación de parámetros nacionales y básicos para el procesamiento y utilización de los residuos sólidos y líquidos de tambos. INIA FPTA No. 138

Gutiérrez, S., Cabrera, N. (2007) Criterios de diseño para lagunas de efluentes de tambos en condiciones nacionales. Revista AIDIS, Vol. 1, No. 2., ISSN 0718-378X.

Gutiérrez, S., Cabrera, M.N. (2012) Estimación de los parámetros nacionales y básicos para el manejo de efluentes de tambos. Parte 1: caracterización de la descarga. Ingeniería Química Uruguay, pág 3-9, Julio 2012

Gutiérrez, S., Cabrera, N.; Benítez, A.; Melani, E. (2009) Reducing variability in estimating wastewater composition in dairy farms during milking operations. Bio Systems Engineering 103 (2009) 497 – 503.

Nennich, T. D., Harrison, J. H., VanWieringen, L. M. , Meyer, D., Heinrichs A. J, Weiss, W. P.N. R. St-Pierre, R. L. Kincaid, D. L. Davidson and E. Block. (2005) Prediction of Manure and Nutrient Excretion from Dairy Cattle. J. Dairy Sci. 88:3721–3733

Hjorth, M., Christensen, K.V., Christensen, M.L., Sommer, S.G. (2010) Solid–liquid separation of animal slurry in theory and practice. A review. Agron. Sustain. Dev. 30 (1) 153–180.

Taverna, M.A.; García, K.; Adorni, M.B. (2014) Procedimiento de muestreo de efluentes líquidos y sólidos orgánicos generados en el tambo. Ediciones INTA, Rafaela, Santa Fe, Argentina ISBN 978-987-521-514-6

Van Nieuwenhuijzen, A.F. (2002) Scenario Studies into Advanced Particle Removal in the Physical-Chemical Pre-treatment of Wastewater. Tesis de Doctorado, Technische Universiteit Delft. Delft University Press. ISBN 90-407-2249-8

7. Agradecimientos

En nombre de PraxisLab deseamos agradecer:

- A los proveedores de equipos, que sugirieron posibles casos a evaluar.
- A los productores participantes, que amablemente franquearon el acceso a sus establecimientos y aportaron datos operativos y de producción de los tambos, fundamentales para el desarrollo de esta consultoría.
- Y (“last but not least”) a todo el personal de Biovalor, por su apoyo técnico, calidez humana, y paciencia, durante todo el largo proceso de ejecución de esta consultoría.

Ing. Quím. (M.Sc.) Alberto Hernández