

GUÍA DEL SECTOR

PROCESAMIENTO DE CARNE
CORRECTA GESTIÓN DE LAS
AGUAS RESIDUALES EN EL
SECTOR AGROINDUSTRIAL
PARA BID INVEST



Título y referencia	Guía del sector – Processamiento de carne	Versión final
Cliente	João Paulo Diniz Abud..... Natazha Valarezo..... Paula Valencia.....	jdinizabud@iadb.org natazhav@iadb.org paulava@iadb.org
Preparado por	Mauricio Morera, Wastewater Expert..... Mónica Salas, Wastewater Expert.....	ma.morera@gmail.com msalas@auroraingenieria.com
Aprobado por	Natalia Benavides, Senior Consultant, Futuris..... Emma Tristán, General Director, Futuris.....	natalia@futurisconsulting.com emma@futurisconsulting.com
Contacto Futuris	Futuris Consulting S.A..... Tres Ríos, Cartago, Costa Rica.....	@ http://www.futurisconsulting.com +506 2279-3501

Copyright © [2024] Corporación Interamericana de Inversiones (BID Invest). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO. Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento a BID Invest.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI, vigente en el momento de la disputa. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras de BID Invest que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI), vigentes en el momento de la disputa. El uso del nombre de BID Invest para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Nótese que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

ACLARACIÓN

Este informe ha sido elaborado por Futuris Consulting S.A. con toda la pericia, cuidado y diligencia razonables de acuerdo con los términos del Contrato con el cliente, incorporando nuestras Estipulaciones y Condiciones Generales de Trabajo y teniendo en cuenta los recursos según lo acordado con el cliente. Declinamos toda responsabilidad ante el cliente o terceros con respecto a cualquier asunto que quede fuera del ámbito del encargo, tal y como se define en el Contrato con el cliente. Este informe es confidencial para el cliente y para los terceros específicamente indicados por acuerdo escrito entre Futuris Consulting S.A. y el cliente.

No aceptamos ninguna responsabilidad, de la naturaleza que sea, frente a terceros a los que se dé a conocer este informe, o partes del mismo. Queda a la entera discreción de dichos terceros atenerse o no al informe y confiar en él.

Índice de Contenidos

1 **Introducción**

1.1 Guía del sector y Nota de Buenas Prácticas(NBP).....5

1.2 Fuentes de información.....5

2 **Características del Sector y Producción de Aguas Residuales**

2.1 Panorama general del sector.....6

2.2 Uso del agua en el proceso industrial.....6

2.3 Revisión general de la generación de aguas residuales.....8

2.4 Descripción de la calidad del agua residual8

3 **Mejores Prácticas de Gestión de Aguas Residuales (MPGAR)**

3.1 MPGAR para la prevención de la contaminación9

3.2 Tratamiento de aguas residuales10

3.3 Ejemplo de tratamiento de aguas residuales11

3.4 Indicadores clave de desempeño y monitoreo12

4 **Referencias**

Sigla

BID	Banco Interamericano de Desarrollo
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
EC	Electrocoagulación
EHS	Salud, seguridad y ambiente, por sus siglas en inglés
FAD	Flotación por aire disuelto
GyA	Grasas y aceites
GBM	Grupo del Banco Mundial
ISO	Organización Internacional de Normalización, por sus siglas en inglés
LAC	Latinoamérica y el Caribe
MPGAR	Mejores prácticas de gestión de aguas residuales
NBP	Nota de buenas prácticas
NMP	Número más probable
OD	Oxígeno disuelto
OMS	Organización Mundial de la Salud
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
RAFA	Reactor anaeróbico de flujo ascendente con manto de lodos
SBR	Reactor discontinuo secuencial, por sus siglas en inglés
SST	Sólidos suspendidos totales

7 Introducción



1.1 GUÍA DEL SECTOR Y NOTA DE BUENAS PRÁCTICAS (NBP)

Esta guía del sector se ha elaborado como complemento de la Nota de Buenas Prácticas (NBP) para la gestión de aguas residuales en el sector agroindustrial¹. En las siguientes secciones se ha hecho referencia a la NBP para reducir la duplicación, siempre que la información de la NBP complemente lo que se presenta en esta guía del sector.

El presente documento proporciona una visión integral de las mejores prácticas de gestión de aguas residuales (MPGAR) para gestionar los impactos ambientales de las aguas residuales del procesamiento de carnes – de vacuno, porcino y aves de corral –, ayudando a las empresas a garantizar el cumplimiento de las regulaciones pertinentes, promover prácticas sostenibles que protejan la salud pública y el ambiente. En la Sección 2 se describen las características del sector y en la Sección 3 las MPGAR, incluidas las MPGAR de prevención de la contaminación (Sección 3.1) y las MPGAR de tratamiento de aguas residuales (Sección 3.2).

La información relativa a los indicadores clave de desempeño (KPI, por sus siglas en inglés) está vinculada a los marcos regulatorios específicos de cada país, y esta información se puede encontrar en la Sección 2 y el Anexo I de la NBP. Para una exploración más detallada de los ejemplos de prevención de la contaminación y MPGAR en el tratamiento de aguas residuales,

consulte la Sección 4 y la Sección 5 de la NBP, respectivamente. En la Sección 6 de la NBP se puede encontrar información más detallada sobre el seguimiento.

1.2 FUENTES DE INFORMACIÓN

Esta guía del sector sobre las aguas residuales del procesamiento de carnes se ha desarrollado utilizando varias fuentes de información. Principalmente, se basa en el Manual de Prevención y Reducción de la Contaminación del Banco Mundial (1998), que constituye el marco subyacente de las directrices más especializadas de la industria, conocidas como Directrices sobre el Medio Ambiente, la Salud y la Seguridad para el Procesamiento de Carnes, publicadas por el Grupo del Banco Mundial en 2007. Una recopilación completa de referencias está disponible en la Sección 4. Además, se han incorporado las ideas de las entrevistas realizadas a los clientes con el equipo de BID Invest.

2

Características del Sector y Producción de Aguas Residuales



2.1 PANORAMA GENERAL DEL SECTOR

Las actividades de sacrificio y procesamiento de carne y aves de corral implican una amplia gama de tareas, desde la recepción de los animales hasta la preparación de los cuerpos para su venta o posterior procesamiento. Estas instalaciones y mataderos son grandes consumidores de agua limpia, debido a que la utilizan ampliamente en diversas fases del proceso, como la estabulación, el sacrificio, el escaldado, el desplumado, el desentrañamiento, el deshuesado y las actividades de limpieza asociadas a la higiene de la carne y las instalaciones. En consecuencia, estas operaciones generan volúmenes considerables de aguas residuales que plantean importantes retos ambientales. Las aguas residuales contienen una concentración considerable de sólidos en suspensión y materia orgánica, lo cual genera olores desagradables. La composición de las aguas residuales se complica aún más por la presencia de detergentes y desinfectantes utilizados para la desinfección y la limpieza. Dadas las características de alta resistencia de estos efluentes, son necesarios procesos de tratamiento exhaustivos para garantizar un vertido seguro al ambiente.

Latinoamérica y el Caribe (LAC), a pesar de solo representar el 13.5% de la población mundial, contribuyen a una parte significativa de la producción mundial de carne. El desglose de la producción de carne muestra que la carne de aves de corral es la más importante en la región de LAC, con casi la mitad de la producción total. Le sigue la producción de carne de vacuno

con un 35% y la de porcino con un 16%. En conjunto, estas tres categorías contribuyen a más del 99% de la producción de carne de la región. Brasil se posiciona como el principal productor de carne de la región, responsable de más de la mitad de la producción total de LAC. Ocupa el primer puesto en la producción de carne de vacuno con 19 millones de toneladas, así como en la de porcino con 4.5 millones de toneladas, y en la de aves de corral con casi 13.8 millones de toneladas. México ocupa el segundo puesto, con el 13% de la producción de carne de cerdo y de ave de la región. Por otra parte, Argentina es el segundo productor de carne de vacuno en la región, con un 11% de la producción total².

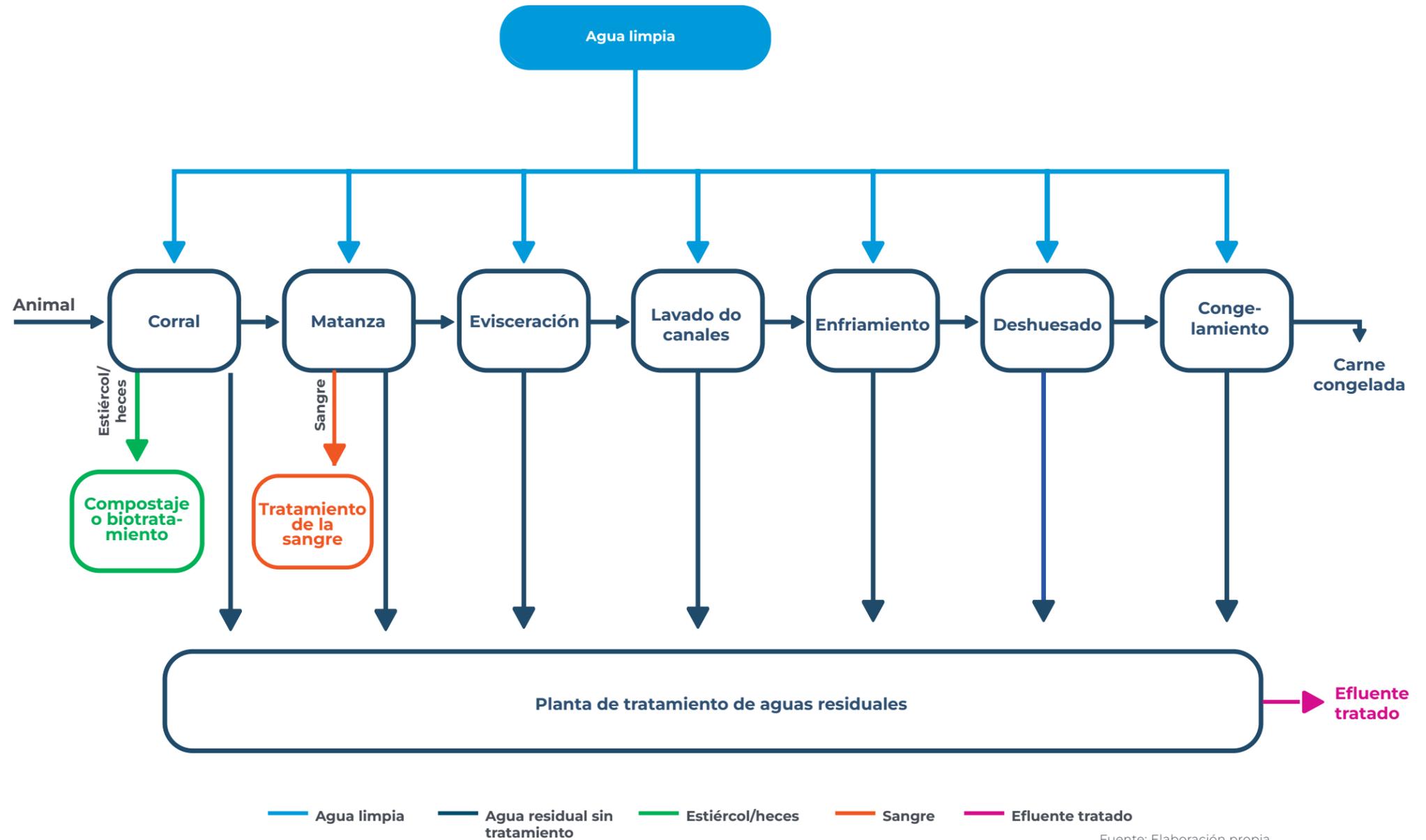
2.2 USO DEL AGUA EN EL PROCESO INDUSTRIAL

La industria cárnica consume directa e indirectamente, al menos un 29% del total de agua dulce utilizada por el sector agrícola. El consumo de agua en mataderos y plantas de procesamiento de carne está estrechamente relacionado con el número y tipo de animales sacrificados. Para producir una tonelada de carne de vacuno, cerdo y aves de corral, se necesitan 15,500 m³, 4,800 m³ y 4,000 m³ de agua dulce, respectivamente^{3,4}.

La industria cárnica utiliza el agua para diversos fines, como el saneamiento, el procesamiento de la carne y el uso de equipos auxiliares (como equipos de lavado,

producción de vapor, generación de agua caliente, compresores de refrigeración y producción de agua helada). El principal uso del agua en las plantas de procesado de carne es el lavado de los cuerpos tras el desollado del ganado y los terneros, el desplumado de las aves o la eliminación del pelo de los cerdos tras el desentrañamiento. También se utiliza agua en la limpieza, la desinfección de equipos e instalaciones, la refrigeración de equipos mecánicos como compresores y bombas, la esterilización de equipos y la limpieza de zonas de trabajo⁵. En la Figura 1 se presenta un diagrama general del uso del agua en una industria cárnica.

FIGURA 1 Diagrama de flujo del consumo general de agua en una planta de procesamiento de carne



2.3 REVISIÓN GENERAL DE LA GENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

2.3.1 CONTAMINANTES PRINCIPALES Y SUS FUENTES

El volumen de aguas residuales generado durante el proceso de sacrificio varía en función del tipo de animal procesado. **El volumen de aguas residuales generado¹ varía en función del tipo de ganado. En el caso del ganado vacuno, el intervalo es de aproximadamente 1.6-9 m³ por tonelada de carne producida. El procesamiento de aves de corral produce un volumen de aguas residuales de 5-15 m³ por tonelada de carcasa de aves de corral, mientras que el procesamiento de cerdos produce 1.6-6 m³ por tonelada de carcasa de cerdo⁶.**

En general, las aguas residuales de las instalaciones de procesamiento de carne contienen diversos contaminantes. No obstante, es importante señalar que la composición de las aguas residuales crudas de las instalaciones de procesamiento se ve influenciada por el tipo de animal que se sacrifica. Entre los contaminantes más comunes se encuentran la sangre, el contenido del estómago y los intestinos, el estiércol, la orina, los recortes de carne, los pelos, las plumas, la grasa, los desinfectantes, los alimentos no digeridos, los patógenos microbianos, los productos farmacéuticos, la carne suelta y los residuos de la limpieza de las instalaciones⁵. El resultado es una composición compleja del agua residual, que incluye grasas, proteínas, fibras, bacterias fecales y, posiblemente, cadáveres infecciosos.

La calidad de las aguas residuales se ve muy influenciada por el proceso de transformación de

la carne. El proceso de extracción de grasas aporta aproximadamente el 60% de la carga orgánica total de una planta. La eficacia de la recolecta de sangre es un factor significativo al momento de determinar la concentración de demanda biológica de oxígeno (DBO) en las aguas residuales. El grado en que el estiércol (orina y heces) se gestione por separado como residuo sólido, es un factor significativo que determina la DBO de las aguas residuales del procesamiento de carne⁷, especialmente cuando procede de zonas receptoras.

Como resultado del sacrificio y procesamiento de la carne, las aguas residuales tienen una elevada cantidad de materia orgánica representada por altas concentraciones de DBO y demanda química de oxígeno (DQO), grasas y aceites (GyA), sólidos suspendidos totales (SST), nutrientes como nitrógeno (N) total y fósforo (P) total, patógenos (especialmente E. coli y Salmonella) y, en ocasiones, antibióticos y metales pesados como cobre, cromo, molibdeno, níquel, titanio, zinc y vanadio⁵. Los detergentes y desinfectantes utilizados para la desinfección y la limpieza también añaden complejidad a la composición de las aguas residuales.

2.3.2 PRINCIPALES IMPACTOS AMBIENTALES

Los efluentes no tratados de la industria cárnica tienen un gran impacto ambiental. Cuando las aguas residuales sin tratar de los mataderos se vierten en cuerpos de agua, pueden afectar gravemente a la calidad del agua al reducir los niveles de oxígeno disuelto (OD). También puede convertir las fuentes de agua en peligros para la salud pública al aumentar la carga bacterias. Además, el vertido de macronutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, puede causar eutrofización al fomentar el crecimiento y la descomposición excesivos de las algas, lo cual conduce a una disminución de la vida acuática, ya que la mineralización de las algas puede causar un agotamiento de los niveles de oxígeno disuelto. Además, compuestos como el cromo y el amoníaco presentes en las aguas residuales de los

mataderos pueden dañar la vida acuática³.

La industria cárnica también es una fuente de contaminación debido a la adición de surfactantes durante el proceso de limpieza. Estos surfactantes son los principales componentes de los detergentes. Pueden entrar en el medio acuático si el tratamiento de las aguas residuales es inadecuado, lo que provoca cambios a corto y largo plazo en el ecosistema que pueden afectar a los seres humanos, los peces y la vegetación³.

Aparte de la contaminación causada por los surfactantes, el nitrato y los aniones de cloruro, las aguas residuales de la industria cárnica también pueden albergar agentes patógenos que perduran en el suelo y siguen propagándose. Estos patógenos suponen un riesgo potencial para la salud humana si se transmiten a través de la exposición a un cuerpo de agua. Por consiguiente, las zonas contaminadas con aguas residuales no tratadas de la industria cárnica no son aptas para beber, nadar o irrigar³.

2.4 DESCRIPCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL

La composición de las aguas residuales de los mataderos varía considerablemente en función de los distintos procesos industriales y de los requisitos específicos de agua, lo cual implica que las aguas residuales de los procesos cárnicos presentan una variación significativa en cuanto a pH, DQO, DBO, SST, GyA, alto contenido en N (procedente de la sangre), P⁹ y otros parámetros. Se calcula que en los mataderos de cerdos se producen 2.4 kg de DBO por tonelada de peso de carcasa. Por otro lado, en los mataderos de vacuno y aves de corral, los valores correspondientes son de aproximadamente 4.4 kg de DBO por tonelada de peso de carcasa y 6.8 kg de DBO por tonelada equivalente de peso vivo¹⁰.

Varios factores influyen en la concentración y composición de los contaminantes de las aguas residuales. Entre estos factores se incluyen el tipo de producto, el programa de producción, los procedimientos operativos, el diseño de la planta de procesamiento, el nivel de gestión del agua empleado y, en consecuencia, la cantidad de agua que se ahorra. En la Tabla 1 se resumen los parámetros de calidad de las aguas residuales crudas de la industria cárnica.

TABLA 1 Parámetros de calidad de las aguas residuales crudas de la industria cárnica

Parámetros	Aguas residuales de mataderos vacunos ³	Aguas residuales de mataderos avícolas ¹¹	Aguas residuales de mataderos porcinos ^{12,13}	Sangre procedente del procesamiento de carne ¹⁴
DQO (mg/L)	500-16,000	2,000 - 7,600	465-10,600	375,000
DBO (mg/L)	150-8,500	750- 3,800	500-4,500	150,000-200,000
SST (mg/L)	200-10,000	800-3,600	610-3,800	
N total (mg/L)	50-850	50-200	50-1,500	
P total (mg/L)	25-200	30-80	30-150	
pH	4.9-8.1	6.0-7.8	5.7-8.0	
GyA (mg/L)	300-2,000	280-1,000	250-10,000	

3

Mejores Prácticas de Gestión de Aguas Residuales (MPGAR)



3.1 MPGAR DE PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

Es esencial aumentar el empleo de tecnologías como la recirculación del agua y las técnicas de gestión preventiva ante la contaminación para lograr la sostenibilidad. Para alcanzar este objetivo, es importante mantenerse actualizados sobre los avances tecnológicos y la investigación científica. Para gestionar eficazmente las aguas residuales, la industria cárnica debe aplicar MPGAR de prevención de la contaminación, para evitar que los contaminantes entren en una planta de tratamiento; en la Sección 4 de la NBP se describe más información sobre la prevención de la contaminación. Los ejemplos de la Tabla 2 deberían fomentar la prevención de la contaminación desde el origen en una instalación de procesamiento de carne.

TABLA 2 Técnicas de gestión para la prevención de la contaminación de las aguas residuales en la industria cárnica

Técnicas de gestión preventiva ante la contaminación	Descripción de controles
General	
Maximizar la segregación de sangre y agua, y recuperar la sangre para su uso en otras industrias como subproducto (al menos el 90%) ^{8,15} .	<ul style="list-style-type: none"> ● Diseñar instalaciones adecuadas para la extracción de sangre. Prolongar el tiempo de sangrado al menos 7 minutos. ● Implementar equipos, formación del personal y métodos de recolección adecuados para garantizar que la sangre se recoge por separado de otros flujos de residuos.
Separar y recircular el agua de refrigeración o reutilizar las aguas residuales relativamente limpias de los sistemas de refrigeración para lavar el ganado, de ser posible ¹⁰ .	<ul style="list-style-type: none"> ● Instalar filtros para eliminar los residuos y partículas del agua de refrigeración antes de reutilizarla. ● Realizar pruebas y controles periódicos de la calidad del agua, al menos trimestralmente, para garantizar que cumple las normas requeridas para el lavado del ganado y otros usos. ● Considerar procedimientos de limpieza in situ para mejorar el consumo de agua, energía y productos químicos. ● Instalar un sistema de recirculación separado para el agua de refrigeración, a fin de evitar que se mezcle con otros flujos de aguas residuales.
Eliminar las grasas de las aguas residuales al inicio del proceso de tratamiento y tratarlas como residuos sólidos o subproductos.	<ul style="list-style-type: none"> ● Implementar un sistema de separación y recolección de grasas en el origen, como trampas de grasa o rejillas. ● Aplicar procedimientos diarios de limpieza y mantenimiento de los equipos de recolección y almacenamiento para evitar olores, derrames y contaminación. ● Eliminar adecuadamente las grasas recolectadas como residuos sólidos o reciclarlas como subproductos, en función de su calidad y cantidad.
Aves	
Minimizar al máximo el consumo de agua en la producción ¹⁶	<ul style="list-style-type: none"> ● Instalar boquillas en las mangueras de limpieza y aumentar la limpieza mecánica de los sólidos. ● Instalar una red de recirculación de agua para el arrastre de plumas. ● Aumentar la frecuencia de la limpieza en seco, utilizando aspiradores de carne y sangre en las instalaciones del matadero. ● Disminuir el tamaño del tanque de escaldado o cambiar el proceso convencional. ● Sustituir el preenfriamiento por inmersión en agua por el preenfriamiento con aire refrigerado. ● Utilizar el efluente generado en el tanque de aturdimiento, tras el prelavado, en el prelavado de las jaulas. ● Reutilizar el efluente del lavado final del proceso de limpieza del matadero en el prelavado de la fábrica de subproductos.
Porcino y vacuno	
Minimizar al máximo el consumo de agua en la producción ¹⁶	<ul style="list-style-type: none"> ● Realizar limpieza previa en seco de los corrales. ● Implementar el vaciado de estómagos en seco. ● Utilizar cámaras de escaldado de funcionamiento automático en lugar de tanques de escaldado para el desollado de los cerdos. ● Sustituir el escaldado por inmersión en agua por un sistema de pulverización.

3.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Diversos procesos biológicos, químicos y físicos suelen tratar las aguas residuales de los mataderos. Dependiendo de las operaciones internas de los mataderos y las plantas de procesamiento de carne, las características de las aguas residuales, la disponibilidad de instalaciones de tratamiento y las normas de descarga de efluentes, las instalaciones pueden tener un proceso de pretratamiento antes de ser liberadas a las plantas de tratamiento. Normalmente, una PTAR se basa en un tratamiento primario y secundario. Se instalan tratamientos terciarios para la desinfección en función del método de vertido final. También existen métodos de gestión de lodos. Existen tecnologías emergentes para el tratamiento de las aguas residuales de la industria cárnica, como la electrocoagulación (EC), el proceso electroquímico de oxidación avanzada y las tecnologías de membrana. Sin embargo, estas requieren un mantenimiento especializado y una elevada inversión de capital. En la Tabla 3 se enumeran diferentes ejemplos de tecnologías.

TRATAMIENTO PRELIMINAR

Dar prioridad a determinadas etapas de pretratamiento es crucial para un funcionamiento óptimo. Las etapas de tamizado y sedimentación reducen significativamente las cargas orgánicas y eliminan los sólidos brutos del afluente. Los tanques de equalización son componentes esenciales que ayudan a homogeneizar las aguas residuales afluentes antes de que lleguen a la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Al igualar el caudal y las características de las aguas residuales, estos depósitos contribuyen a que los procesos de tratamiento sean más uniformes y eficaces. Las trampas de grasa son vitales para eliminar los GyA, que pueden causar problemas mecánicos en tuberías y equipos, e inhibir la actividad de los microbios que intervienen en el proceso de tratamiento.

TRATAMIENTO PRIMARIO O FÍSICO-QUÍMICO

Los tratamientos físicos incluyen sedimentación, aireación y filtración. Los tratamientos químicos incluyen la coagulación, que elimina eficazmente los coloides y las partículas finas, y reduce el tiempo necesario para sedimentar los sólidos en suspensión; sin embargo, requiere el uso frecuente de reactivos químicos y, por lo tanto, genera contaminantes secundarios. También podrían aplicarse tratamientos fisicoquímicos como los sistemas de flotación por aire disuelto (FAD), ya que permiten elevados índices de eliminación de DQO, color y turbidez. No obstante, es importante considerar sus elevados costos energéticos, su mal funcionamiento ocasional, su eliminación moderada de nutrientes y la posible eliminación limitada de los lodos debido a su toxicidad³.

TRATAMIENTO SECUNDARIO

Al considerar la alta concentración de materia orgánica en las aguas residuales de las plantas de procesamiento de carne, como se indica en la Tabla 1, con hasta 8,500 mg/L de DBO, el uso de tratamiento secundario (biorreactores) es más común en comparación con alternativas más costosas como la electrocoagulación, la separación por membranas y la oxidación avanzada. La integración de métodos de digestión aeróbica y anaeróbica mejora la eliminación de contaminantes de las aguas residuales de los mataderos. Este enfoque tiene sentido porque depender únicamente de métodos aeróbicos se convierte en un reto debido a sus elevados requisitos energéticos.

Cuando se incorporan biorreactores, es crucial gestionar cuidadosamente la entrada de aguas residuales para evitar la acumulación de sustancias inhibitorias como metales pesados y antibióticos. Para el tratamiento anaerobio se emplean principalmente métodos como los digestores anaerobios, los reactores anaeróbicos de flujo ascendente con manto de lodos (RAFA), los reactores discontinuos secuenciados (SBR) y las lagunas. La digestión anaerobia es muy ventajosa para tratar eficazmente aguas residuales con elevados niveles de materia orgánica, generando al mismo tiempo un valioso biogás para la producción de energía o calefacción. Sin embargo, para ello es necesario llevar a cabo etapas de desulfuración y remoción de la humedad.

Cuando se utilizan reactores anaerobios es necesario un tratamiento adicional del material digerido (digestato), debido a la materia orgánica, los patógenos, el olor y los nutrientes como el N y el P. Si este efluente se vierte directamente en cuerpos de agua o se utiliza en el riego, podría contaminar el agua o el suelo. Para gestionar de forma afectiva el digestato, deben considerarse medidas adicionales como la implementación de reactores aeróbicos o de un sistema de filtración; entre las tecnologías comúnmente empleadas se incluyen los filtros percoladores, las lagunas y los reactores de lodos activados.

TRATAMIENTO TERCIARIO

La mayoría de las instalaciones de tratamiento también tendrán que aplicar un tratamiento terciario, el cual consiste en una etapa de desinfección para matar o inactivar los agentes patógenos nocivos presentes en las aguas residuales antes de verterlas al ambiente⁵.

TRATAMIENTO DE LODOS

En las fases de tratamiento primario y secundario de la industria cárnica pueden producirse volúmenes importantes de lodos. La gestión de estos lodos suele implicar el empleo de tecnologías como lechos de secado, centrifugadoras o decantadores para su deshidratación. Estos procesos no solo ayudan a reducir el contenido de humedad de los lodos, sino que también producen biosólidos, que se utilizan en actividades como el compostaje o la producción de fertilizantes. Las investigaciones en curso se dedican a comprender los posibles efectos de otros contaminantes presentes en los lodos, como metales pesados, patógenos, medicamentos antimicrobianos, hormonas, pesticidas y desinfectantes. Aunque estos componentes pueden introducirse en cantidades mínimas durante el procesado o tratamiento del producto, existe una especial preocupación por su posible acumulación en el suelo y los cultivos. Esta aprensión va acompañada de posibles pérdidas inadvertidas por escorrentía superficial o cercana a la superficie, que podrían llegar a los medios acuáticos¹⁷.

TABLA 3 Tecnologías de tratamiento comunes para las aguas residuales de la industria cárnica

Industria	Tratamiento preliminar	Tratamiento primario	Tratamiento secundario	Tratamiento terciario	Tratamiento de lodos	Tecnologías emergentes
Procesamiento de carne.	Ecuilibración del caudal, rejillas y filtros mecánicos.	Cuencas de sedimentación, DAF y regulación del pH (de ser necesario).	El tratamiento anaeróbico, como los filtros anaeróbicos y RAFA, va seguido de reactores aeróbicos o estanques.	Cloro, ozono, UV (si hay patógenos, especialmente si las aguas residuales se riegan).	Los lodos producidos en el tratamiento primario y secundario deben deshidratarse antes de su eliminación mediante lechos de secado de lodos, centrifugadoras o decantadores. Se recomienda secar aún más los lodos para producir biosólidos que puedan reutilizarse.	Ultrasonidos, electrocoagulación, proceso de oxidación avanzada, oxidación electroquímica y tecnologías de membrana como microfiltración, nanofiltración, ultrafiltración, ósmosis inversa y electrodialisis ^{18,19} .

3.3 EJEMPLO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En la Figura 2 se presenta un estudio de caso de un matadero avícola²⁰. En esta planta, ubicada en Sorocaba, Brasil, se realizó un estudio sobre el sistema de tratamiento de aguas residuales de un matadero de aves. El sistema consiste en tamices rotativos y estáticos, un sistema de flotación por aire disuelto (DAF, por sus siglas en inglés) y dos reactores UASB. Los tamices eliminan residuos sólidos mayores de 1,000 µm y 750 µm. El efluente proveniente del tamiz estático y la fracción líquida de la sangre se recolectan en un tanque de igualación de 142 m³ antes de ingresar al sistema DAF y a los reactores UASB.

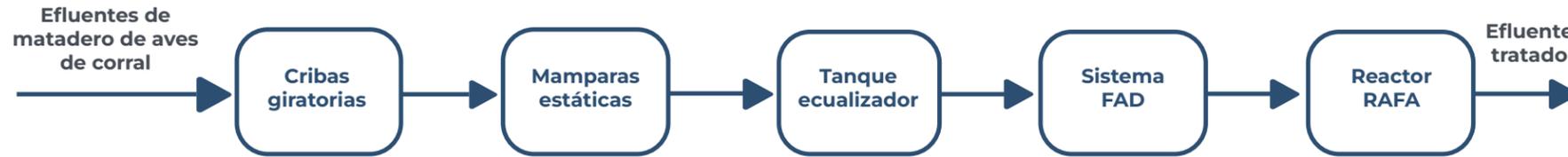
Los reactores fueron inoculados con lodo proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales, y el período de arranque duró 163 días. Se añadió una base al flujo de entrada de los reactores para mantener condiciones de amortiguación del pH. La aplicación de tasas de carga superficial de 1.6 ± 0.4 m³/m²/h al sistema DAF

resultó en eficiencias promedio de remoción del 51% para grasas y aceites (FOG) y del 37% para sólidos suspendidos totales (TSS).

Los reactores UASB demostraron un desempeño similar y satisfactorio, con eficiencias de remoción de 67% para la DBO y 85% para la DQO, a pesar de las tasas de carga orgánica variables, que oscilaron entre 0.9 y 2.7 kg DQO/m³/día, y las velocidades ascendentes que variaron entre 0.2 y 0.5 m/h.

Los hallazgos sugieren que los reactores UASB son adecuados para mantener una eficiencia operativa aceptable, incluso ante la expansión proyectada en la producción de carne de pollo dentro de la industria. Sin embargo, es necesario abordar las sustancias orgánicas y nutrientes remanentes para garantizar que la calidad del efluente cumpla con los parámetros de descarga, salvaguardando los cuerpos de agua receptores (como el cumplimiento de límites máximos permisibles de descarga establecidos por organismos como el WBG). Por lo tanto, una unidad de tratamiento secundario suplementaria, como una laguna anaerobia, debe complementar el sistema de tratamiento de aguas residuales.

FIGURA 2 Diagrama de flujo del proceso final en un matadero de aves de corral en Brasil²⁰



Fuente: Elaboración propia

3.4 INDICADORES CLAVE DE DESEMPEÑO Y MONITOREO

Cada país dispone de normas específicas para la gestión y reutilización de las aguas residuales, con reglamentos que establecen umbrales de calidad del agua admisibles para distintas situaciones, como el vertido en cuerpos de agua, zonas costeras y sistemas de alcantarillado sanitario, así como la reutilización de las aguas residuales depuradas. La NBP en la Sección 2.2. incluye una comparación de los parámetros de calidad establecidos en distintos países. La Tabla A-1 del Anexo I de la NBP ofrece una visión global del marco legislativo para la gestión de las aguas residuales en la región de LAC.

Las Directrices sobre Ambiente, Salud y Seguridad para el Procesado de Productos Lácteos del Grupo del Banco Mundial (GBM) establecen los límites máximos admisibles de vertido en cuerpos de agua para los parámetros enumerados a continuación en la Tabla 4²¹. Estos límites deben ser alcanzables en condiciones normales de funcionamiento en instalaciones

diseñadas y operadas adecuadamente, y pueden utilizarse como indicadores clave del desempeño del tratamiento de aguas residuales. Los nuevos proyectos deben cumplir las Directrices sobre Ambiente, Salud y Seguridad de la NBP, o la normativa nacional (Anexo I de la NBP), la que sea más estricta.

TABLA 4 Límites admisibles de los vertidos en los cuerpos de agua²²

Contaminante	Valor guía
pH	6-9
DBO ₅	50 mg/L
DQO	250 mg/L
N _{Total}	10 mg/L
P _{Total}	2 mg/L
Grasas y aceites	10 mg/L
SST	50 mg/L
Aumento de temperatura	< 3 °C
Bacterias coliformes totales	400 MPN/100 mL

Para prevenir los impactos ambientales y sociales, es crucial controlar periódicamente la calidad de los efluentes y proporcionar mecanismos de retroalimentación adecuados. En la Sección 6 de la NBP se proporciona más información sobre la correcta gestión de las aguas residuales en el sector agroindustrial. Es esencial desarrollar y aplicar un programa con recursos suficientes y supervisión de la gestión para alcanzar los objetivos de un programa de seguimiento de las aguas residuales y la calidad del agua. La Tabla 9 de la NBP describe los puntos de muestreo y los requisitos analíticos para las muestras de aguas de proceso y aguas residuales, y recomienda una frecuencia de muestreo. Priorizar el cumplimiento de las regulaciones locales y de otros mandatos establecidos por instituciones financieras o políticas internas para el monitoreo de aguas residuales y calidad del agua debe ser siempre una prioridad. Aunque la frecuencia de muestreo sugerida puede ser un buen punto de partida, es esencial comprender y cumplir la normativa local y los requisitos establecidos por los organismos reguladores.

En el caso de las aguas residuales de la industria cárnica, el control de parámetros como el pH, la concentración de OD, la turbidez, la temperatura, el nitrógeno y el fósforo totales, la DQO, los SST y el caudal de agua del efluente tratado debe

realizarse con una frecuencia que pueda proporcionar datos representativos (para más información, consulte la Sección 6.5. de la NBP). La información registrada debe incluir la fecha, la hora, los resultados de las mediciones, los ajustes realizados y otros datos relevantes. Es necesario utilizar equipos calibrados y asegurar que operarios capacitados realizan las mediciones. También se requiere un espacio de laboratorio en la planta de tratamiento para esta tarea. Deben establecerse procedimientos de registro para documentar los resultados del control. Los laboratorios externos certificados (preferiblemente ISO 17025) deberán proporcionar registros de seguimiento para los análisis microbianos y fisicoquímicos, y la frecuencia dependerá de los marcos normativos de cada región. La recomendación es hacerlo, al menos, trimestralmente.

4

Referencias

- (1) Futuris Consulting. Good Practice Note: Wastewater Management for the Agribusiness Sector, 2023.
- (2) FONTAGRO. Meat production in Latin America and the Caribbean. <https://www.fontagro.org/en/publications/press/meat-production-in-latin-america-and-the-caribbean/>.
- (3) Bustillo-Lecompte, C.; Mehrvar, M.; Quiñones-Bolaños, E. Slaughterhouse Wastewater Characterization, and Treatment: An Economic and Public Health Necessity of the Meat Processing Industry in Ontario, Canada. *J. Geosci. Environ. Prot.* 2016, 04 (04), 175–186. <https://doi.org/10.4236/gep.2016.44021>.
- (4) Maré, F. A.; Jordaan, H. The Water Footprint of Primary and Secondary Processing of Beef from Different Cattle Breeds: A Value Fraction Allocation Model. *Sustainability* 2021, 13 (12), 6914. <https://doi.org/10.3390/su13126914>.
- (5) Kharat, D. S. Pollution Control in Meat Industry. *Curr. Environ. Eng.* 2019, 6 (2), 97–110. <https://doi.org/10.2174/2212717806666190204102731>.
- (6) European Commission. Integrated Pollution Prevention and Control: Best Available Techniques in the Slaughterhouses and Animal By-Products Industries, 2005.
- (7) US EPA. Development Document for the Proposed Effluent Limitations Guidelines and Standards for the Meat and Poultry Products Industry Point Source Category, 2002.
- (8) World Bank Group. Environmental, Health and Safety Guidelines for Meat Processing, 2007.
- (9) Aleksić, N.; Nešović, A.; Šušteršič, V.; Gordić, D.; Milovanović, D. Slaughterhouse Water Consumption and Wastewater Characteristics in the Meat Processing Industry in Serbia. *DESALINATION WATER Treat.* 2020, 190, 98–112. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25745>.
- (10) Food and Agriculture Organization of the United Nations. Management of Waste from Animal Product Processing; 1996. <https://www.fao.org/3/x6114e/x6114e00.htm>.
- (11) Ngobeni, P. V.; Basitere, M.; Thole, A. Treatment of Poultry Slaughterhouse Wastewater Using Electrocoagulation: A Review. *Water Pract. Technol.* 2022, 17 (1), 38–59. <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.108>.
- (12) Suceveanu, M.; Suceveanu, I.; Grosu, L.; Alexa, I.-C. Treatment of Wastewater from Swine and Poultry Slaughterhouses. 2018, 24 (2).
- (13) Villarroel Hipp, M. P.; Silva Rodríguez, D. Bioremediation of Piggery Slaughterhouse Wastewater Using the Marine Protist, *Thraustochytrium Kinney VAL-B1*. *J. Adv. Res.* 2018, 12, 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2018.01.010>.
- (14) Yetilmezsoy, K.; Ilhan, F.; Kiyan, E.; Bahramian, M. A Comprehensive Techno-Economic Analysis of Income-Generating Sources on the Conversion of Real Sheep Slaughterhouse Waste Stream into Valorized by-Products. *J. Environ. Manage.* 2022, 306, 114464. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114464>.
- (15) Philipp, M.; Masmoudi Jabri, K.; Wellmann, J.; Akrouf, H.; Bousselmi, L.; Geißen, S.-U. Slaughterhouse Wastewater Treatment: A Review on Recycling and Reuse Possibilities. *Water* 2021, 13 (22), 3175. <https://doi.org/10.3390/w13223175>.
- (16) Bailone, R.; Roça, R.; Fukushima, H.; De Aguiar, L. K. Sustainable Water Management in Slaughterhouses by Cleaner Production Methods—a Review. *Renew. Agric. Food Syst.* 2021, 36 (2), 215–224. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000083>.
- (17) Shi, W.; Healy, M. G.; Ashekuzzaman, S. M.; Daly, K.; Leahy, J. J.; Fenton, O. Dairy Processing Sludge and Co-Products: A Review of Present and Future Re-Use Pathways in Agriculture. *J. Clean. Prod.* 2021, 314, 128035.
- (18) Fatima, F.; Du, H.; Kommalapati, R. R. Treatment of Poultry Slaughterhouse Wastewater with Membrane Technologies: A Review. *Water* 2021, 13 (14), 1905. <https://doi.org/10.3390/w13141905>.
- (19) Ng, M.; Dalhatou, S.; Wilson, J.; Kamdem, B. P.; Temitope, M. B.; Paumo, H. K.; Djelal, H.; Assadi, A. A.; Nguyen-Tri, P.; Kane, A. Characterization of Slaughterhouse Wastewater and Development of Treatment Techniques: A Review. *Processes* 2022, 10 (7), 1300. <https://doi.org/10.3390/pr10071300>.
- (20) Del Nery, V.; de Nardi, I. R.; Damianovic, M. H. R. Z.; Pozzi, E.; Amorim, A. K. B.; Zaiat, M. Long-Term Operating Performance of a Poultry Slaughterhouse Wastewater Treatment Plant. *Resour. Conserv. Recycl.* 2007, 50 (1), 102–114. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.06.001>.
- (21) World Bank Group. Environmental, Health, and Safety Guidelines for Dairy Processing, 2007.
- (22) World Bank Group. Environmental, Health, and Safety Guidelines for Aquaculture, 2007.

