

Aplicación de las *tecnologías de reproducción asistida* para reducir las emisiones de CO₂ en sistemas productivos de *carne y leche*



Fotografía cortesía: @agropecuariaandaquies

Pietro Sampaio Baruselli 1*, Lais Ângelo de Abreu 1, Vanessa Romário de Paula 2, Bruno Carvalho 2, Emanuelle Gricio 1, Fernando Kenji Mori 1, Lígia Mattos Rebeis 1, Sofia Albertini², Alexandre Henrily de Souza 3, Michael J. D' Occhio 4

1 Departamento de Reproducción Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Ciencia Animal, Universidad de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil 2 brasileño Agrícola Corporación de Investigación, EMBRAPA, Juiz de Fora, MG, Brasil 3 Cargill Nutrición y Salud Animal, Campinas, SP, Brasil, 13091-611 4 facultad de Ciencias de la Vida y el Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad de Sydney, Sydney, Australia.

Ponencia presentada en el 15° Simposio Internacional de Reproducción Bovina organizado por el Instituto de Reproducción Animal Córdoba – IRAC. Córdoba – Argentina, agosto 2024

La población mundial de ganado vacuno de *carne y leche* combinada es de aproximadamente 1.500 millones. Entre los *herbívoros* domésticos a nivel mundial, el ganado aporta alrededor del 20% de la *carne* y el 85% de la *leche*. Se prevé que la demanda mundial de *carne y leche* aumentará un 57% y un 48%, respectivamente, entre 2005 y 2050 (Alexandratos y Bruinsma, 2012). Por lo tanto, el ganado seguirá teniendo un papel muy importante en la futura seguridad alimentaria mundial (Davis & White, 2020).

La producción de *carne y leche* ocurre en diversos ambientes y en sistemas tanto extensivos como intensivos (Faverdin et al., 2022). En los sistemas extensivos el ganado se encuentra en pastizales y sabanas que son adecuadas para la producción animal con bajos costos y bajos insumos. Los sistemas intensivos de *carne y leche* utilizan y agregan valor a fuentes de alimento que son inadecuadas o excedentes para el consumo humano. Las tierras de pastoreo cubren alrededor del 25% de la superficie terrestre mundial (Mottet et al. 2018) y la *carne* vacuna producida en sistemas intensivos representa <15% de la producción mundial de *carne* vacuna (Mottet et al., 2017).

La huella ambiental de la producción ganadera ha recibido una mayor atención a nivel mundial (Knapp et al., 2014; Faverdin et al., 2022). La emisión de *metano* por la ganadería se ha reconocido desde hace unos 30 años (Johnson & Johnson, 1995) y se ha convertido en un foco particular,

ya que el ganado aporta alrededor del 4,5-5,0% del *metano* global antropogénico total (Wallace et al., 2015; Hayes et al., 2016; de Haas et al., 2021; et al., 2022; Hossein-Zadeh, 2022; Galyean y Hales, 2023).

La mayor parte del *metano* producido por el ganado proviene de la fermentación entérica de carbohidratos complejos en azúcares simples por parte de protozoos metanogénicos (Bowen et al., 2020). La biología y función del rumen ha sido bien revisada (Ross et al., 2013; Knapp et al., 2014). La capacidad de digerir celulosa para convertirlo en energía y proteínas utilizables es posiblemente la mayor ventaja, pero también la mayor desventaja del ganado. La abundancia relativa de microbios metanogénicos y no metanogénicos ruminales influye en la cantidad de *metano* producido por un animal individual (Bowen et al., 2020). La población de microorganismos ruminales ahora puede determinarse mediante la abundancia de genes microbianos (Roehe et al., 2016).

Las *tecnologías de reproducción asistida* pueden tener un impacto importante en la mejora de la productividad del ganado vacuno de *carne y leche*. La *inseminación artificial (IA)* y la *ovulación múltiple* y la *transferencia de embriones (MOET)* aumentan la tasa de diseminación de animales con rasgos que tienen un alto mérito genético y una alta capacidad productiva. Sin embargo, las tecnologías avanzadas de *IA* y *MOET* no aumentan la tasa de ganancia genética de una generación a la

siguiente. Este último está controlado por el intervalo generacional que es relativamente largo en el ganado (Scheffers y Weige 2012; Kasinathan et al. 2015). El intervalo generacional se puede acortar en el ganado mediante la utilización de ovocitos de vaquillonas en etapas tempranas de su vida para producir embriones de *FIV* (Baruselli et al., 2016; Baldassarre & Bordignon, 2018).

Esta revisión busca demostrar cómo la *tecnología de reproducción asistida (ART)* y el *manejo reproductivo* se pueden utilizar para generar ganado que tenga mayor eficiencia y produzca menos *metano*.

Eficiencia reproductiva en bovinos y aplicación de inseminación artificial para mejorar la eficiencia y reducir la emisión de *metano*

En la producción bovina, el sistema de cría utiliza aproximadamente el 70% de los recursos. Por lo tanto, la selección para la *eficiencia reproductiva* tiene una influencia importante tanto en la eficiencia como en la rentabilidad. Con una alta eficiencia reproductiva, se necesitan menos vacas para producir la próxima generación de terneros y, esto reduce la necesidad de recursos, la producción de *metano* del rodeo y los costos (Hegarty y McEwan, 2010). Además, las vacas reproductivamente ineficientes son eliminadas de los rodeos.

En un sistema de producción de *carne* vacuna de los Estados Unidos,

una mejora en la eficiencia reproductiva (0,5 a 1 ternera/año) resultó en una reducción del 34% en el uso de agua, del 44% en el uso de la tierra y del 39% en el equivalente de CO₂ (CO₂-eq) huella (Davis y White, 2020). Las tecnologías de reproducción asistida se pueden incorporar a los programas de cría de rodeos de carne para mejorar aún más la eficiencia y reducir la intensidad de las emisiones de CO₂-eq.

En Brasil, el uso de la *inseminación artificial a tiempo fijo (IATF)* en un rodeo de cría redujo la edad al primer parto de 48 a 24 meses y aumentó la tasa de destete del 60% al 80% en comparación con el servicio natural (Abreu et al., 2022). Hubo una reducción del 37,7% en el pasto requerido y una reducción del 85,4% en CO₂-eq para producir 400 terneros (Abreu et al., 2022). El CO₂-eq se calculó según unidades ganaderas (1 UG=450 kg de peso vivo) y se estimó una carga ganadera de 1 UG por hectárea de pasto para producir terneros (Figueiredo et al., 2017). El sistema de baja eficiencia reproductiva (*servicio natural*) emitió 3.714,5 toneladas de CO₂-eq al año mientras que el sistema de alta eficiencia reproductiva (*IATF*) emitió 2.311,3 toneladas de CO₂-eq anualmente. El sistema *IATF* generó 84.196 dólares EE.UU. en créditos para reducir las emisiones de CO₂-eq (*cotizadas a 60 dólares EE.UU. por 1 tonelada de CO₂-eq*). La *IATF* se ha aplicado en vaquillonas de *carne* para reducir la edad de la primera preñez y del parto (Baruselli et al., 2017), lo que afecta la eficiencia reproductiva durante toda la vida y las emisiones de CO₂ equivalente. La *IATF* también se puede utilizar para gestionar los intervalos entre partos para que las vacas produzcan un ternero anualmente (Sá Filho et al., 2013; Baruselli et al., 2018a).

Los mismos principios básicos abordados anteriormente se aplican en el ganado *lechero* (Hutchinson et al., 2013). Por ejemplo, reducir la edad al primer parto y la tasa de descarte

disminuyó la cantidad de vaquillonas de reposición necesarias y la emisión de *metano* entérico por unidad de kg de leche con energía corregida (CH₄/ECM; Knapp et al., 2014). Mejorar la fertilidad de los rodeos lecheros puede reducir potencialmente las emisiones de *metano* hasta en un 25% (Garnsworthy, 2004).

Recientemente estudiamos la influencia del intervalo entre partos (*IP, es decir, eficiencia reproductiva*) en la huella de CO₂-eq de vacas lecheras en lactancia utilizando una metodología de evaluación del ciclo de vida (Abreu et al., 2023). Se realizó una comparación entre la producción y CO₂-eq/leche (*corregido por contenido de grasa y proteína*) de vacas con un *IP* de 13 o 15 meses. El período de lactancia se estimó en 11 y 13 meses para vacas con un *IP* de 13 o 15 meses, respectivamente (Cole & Null, 2009; Biassus et al., 2010). Las emisiones totales de gases de efecto invernadero por 1 kg de leche (CO₂-eq/leche) fueron de 0,657 cuando el índice *IP* fue de 13 meses y de 0,703 (*aumento del 7%*) cuando el índice *IP* fue de 15 meses.

Tecnologías embrionarias para mitigar la emisión de *metano*

El ganado *lechero* puede sufrir *estrés por calor (EC)* durante el verano, lo que disminuye el consumo de materia seca (CMS), la ganancia diaria, la producción de leche y la fertilidad (Kadzere et al., 2002; Hansen, 2007). Durante el *EC*, la producción de leche disminuye más que la ingesta de materia seca, lo que aumenta la emisión de CO₂-eq/kg de leche con energía corregida (Rhoads et al., 2009). El *EC* contribuye al descarte y muerte de las vacas (St-Pierre et al., 2003). La reducción de la fertilidad se asocia con una foliculogénesis ovárica alterada y la función oviductal y un aumento de la mortalidad embrionaria. Esto último puede controlarse durante los períodos de *EC* reemplazando el servicio natural y la inseminación artificial (IA) por

la transferencia de embriones derivados *in vivo* o *in vitro* a las vacas el día 7 del ciclo estral (Hansen, 2007; Baruselli et al., 2020).

Desarrollamos un modelo de simulación que comparó el uso de *IA* o *transferencia de embriones (TE)* en vacas lecheras con *EC* (Figura 1). El modelo asumió que la preñez por *IA (P/AI)* y *P/TE* durante *EC* fueron alrededor del 17 y 40%, respectivamente, y la tasa de servicio fue del 60% para *IA* y del 50% para *TE* (*la TE se realizó solo en animales con un cuerpo lúteo*) (Baruselli et al., 2018b). La tasa de preñez después de 105 días de servicio fue del 34,6% para la *IA* y del 53,1% para la *TE* (*aumento del 53,6%*). Las vacas sometidas a *IA* tuvieron un mayor número de días abiertos (59,3 días) que las vacas expuestas a *TE* (52,5 días) después del inicio del programa de servicio. Esto muestra que es posible aumentar la tasa de preñez a los 21 días en ocho puntos porcentuales utilizando *TE* en lugar de *IA* en vacas lecheras con *EC*. Como se señaló anteriormente, los intervalos entre partos más cortos están asociados con un balance reducido de CO₂-eq en el ganado.

Como se señaló anteriormente en esta revisión, las tecnologías avanzadas de *IA* y *MOET* no aumentan la tasa de ganancia genética. Esto último está controlado por el intervalo generacional que es relativamente largo en el ganado (Scheffers & Weige, 2012; Kasinathan et al., 2015). El intervalo generacional se puede acortar en el ganado mediante la utilización de ovocitos de vaquillonas en etapas tempranas de su vida. Las ondas de crecimiento folicular ocurren antes del nacimiento y en las primeras semanas después del nacimiento en las terneras (Evans et al., 1994a, 1994b; Monteiro et al., 2009). Los ovocitos se pueden recuperar antes del nacimiento (Betteridge et al., 1989; Georges & Massey, 1991; Kauffold et al., 2005) y mucho antes de la pubertad (Onuma et al., 1970; Baruselli et al., 2016), y se pueden utilizar para generar embriones

viales en el laboratorio utilizando la producción de embriones *in vitro* (PIV) (Baruselli et al., 2022).

Las vaquillonas prepúberes muestran una buena respuesta ovárica a la superestimulación con FSH y se puede recuperar una cantidad relativamente grande de ovocitos para PIV (Baruselli et al., 2022). La PIV es menos eficiente para los ovocitos de vaquillonas prepúberes en comparación con las vaquillonas y vacas adultas y se necesita más investigación para optimizar la PIV en vaquillonas prepúberes (Baruselli et al., 2022). Sin embargo, la PIV con ovocitos de vaquillonas jóvenes ha surgido como una tecnología fundamental que permite la explotación de la selección genómica para producir ganado caracterizado por su eficiencia, fertilidad y bajas emisiones de CH₄.

Equilibrando la eficiencia alimenticia en la producción de carne y leche con la fertilidad y las bajas emisiones de CO₂-eq.

El ganado bovino consume una cantidad relativamente grande de biomasa y tiene un índice de conversión alimenticia bajo en comparación con otros animales (FAO, 2018; Mottet et al., 2018). El suministro de alimento suele representar entre el 70% y el 80% de los costos de producción tanto en sistemas extensivos como intensivos (Mottet et al., 2018). Por lo tanto, existe un interés considerable en identificar y multiplicar el ganado que haya mejorado la *eficiencia alimenticia* (Løvendahl et al., 2018; Davis y White, 2020). Esto se aplica tanto a sistemas extensivos como intensivos (Hietala & Juga, 2017; Kava et al., 2023).

Las relaciones entre la *eficiencia alimenticia*, la producción de *metano* y la *sostenibilidad* se conocen desde hace más de 20 años (Arthur & Herd, 2005; Nkrumah et al., 2006; Freetly & Brown-Brandl, 2013). La

heredabilidad relativamente alta del crecimiento y la *eficiencia alimenticia* en el ganado se reconoció hace unos 70 años y se confirmó posteriormente (Knapp Jr & Nordskog, 1946; Berry & Crowley, 2013; González-Recio et al., 2014; Sypniewski et al., 2021). Más recientemente, se han identificado polimorfismos de un solo nucleótido (SNP) para determinar la *eficiencia alimenticia* en el ganado y se han utilizado en la selección genómica (Arthur, 2015; Seabury et al., 2017; Sypniewski et al., 2021; Madilindi et al., 2022; Buss et al., 2023).

Como se señaló anteriormente, la abundancia relativa de microorganismos ruminales acetogénicos y metanogénicos influye en la emisión de *metano* de los animales individuales. Existe un efecto significativo del huésped sobre la población de microorganismos ruminales, y se ha propuesto que la abundancia de genes microbianos puede usarse para seleccionar ganado en función de su *eficiencia alimenticia* y crecimiento (Roehle et al., 2016). El genoma del ganado puede influir en la población de microorganismos ruminales y, por tanto, en el perfil del genoma de los microorganismos ruminales que determina la producción de *metano* (Difford et al., 2018; O'Hara et al., 2020; González-Recio et al., 2023). La caracterización del perfil genético del microorganismo ruminal se ha propuesto como una alternativa a los métodos costosos y que requieren mucho tiempo para evaluar la *eficiencia alimenticia* en el ganado (Arthur & Herd, 2005; Basarab et al., 2013; Kenny et al., 2018; Terry et al., 2021).

Los genes de crecimiento y *eficiencia alimenticia* muestran polimorfismo de un solo nucleótido (Abo-Ismael et al., 2013; Seabury et al., 2017; Madilindi et al., 2022; Buss et al., 2023). La emisión de *metano* también muestra polimorfismo de un solo nucleótido en el ganado (Sarghale et al., 2020). La llegada de los *marcadores de genes moleculares* ha creado la oportunidad de identificar con precisión el

ganado con genes deseables y luego utilizar ART para multiplicar y diseminar rápidamente el ganado con una mejor *eficiencia alimenticia* y *rendimiento de crecimiento*. En un estudio se informó que el ganado eficiente había reducido las emisiones de CH₄ (g/día) y CO₂ equivalente (g/día) (Callegaro et al., 2022).

Las tecnologías reproductivas utilizadas para optimizar los índices reproductivos dependerán del sistema de producción y los recursos disponibles. Por ejemplo, la IA y la TE ya se utilizan en sistemas lecheros intensivos. La *inseminación artificial* puede adoptarse en sistemas extensivos de carne como se ha demostrado en América Latina (Baruselli et al., 2004; Ferraz et al., 2012; Sartori et al., 2016; Mapletoft et al., 2018; Bó et al., 2018). Los sistemas de rodeos de carne de bajos costos y bajos insumos (*América del Norte y del Sur, norte de Australia, Asia meridional, África subsahariana*) seguirán dependiendo del servicio natural. Para estas regiones, los centros de reproducción utilizarán *selección genómica* y ART para producir embriones machos y/o toros para su diseminación para el servicio natural.

Si bien la *eficiencia alimenticia* es sin duda un rasgo comercialmente importante en el ganado de carne y leche, la selección de la *eficiencia alimenticia* no debe hacerse a expensas de otros rasgos importantes (Mu et al., 2016). Como se ha argumentado en esta revisión, la fertilidad tiene un impacto importante en la productividad y las ganancias de las empresas tanto en los sistemas de carne como de leche. Los estudios en toros jóvenes británicos y europeos (*Bos taurus*) en crecimiento mostraron consistentemente asociaciones negativas entre la *eficiencia alimenticia* y las medidas de fertilidad, incluido el crecimiento y la morfología testicular y las características del plasma seminal y los espermatozoides (Awda et al., 2013; Fontoura et al., 2016; montaholi et al., 2016; Bourgón et al., 2018). Por el contrario, un estudio en toros de

razas sintéticas en crecimiento (*Bos taurus x Bos indicus*) encontró que las medidas de fertilidad no diferían para toros con diferente *eficiencia alimenticia* (Kowalski et al., 2017). Se informó que las vaquillonas con *mayor eficiencia alimenticia* eran más delgadas y alcanzaron la pubertad más tarde que las vaquillonas con menor *eficiencia alimenticia* (Randel y Welsh, 2013). En otro estudio, las vaquillonas con buena *eficiencia alimenticia* alcanzaron la pubertad antes que las vaquillonas con peor *eficiencia alimenticia* (Canal et al., 2020). Otros estudios en vacas también han demostrado un efecto negativo de la *eficiencia alimenticia* sobre la fertilidad (Mu et al., 2016; Ferreira Jr et al., 2018) o ningún efecto (Crowley et al., 2011; Davis et al., 2016).

Un estudio en vacas *lecheras* en condiciones comerciales informó que las vacas con alta *eficiencia alimentaria* tenían un mayor intervalo entre partos (Vallimont et al., 2013). El ganado lechero seleccionado por su producción de leche y *eficiencia alimenticia* tuvo un balance de *metano* reducido como resultado del aumento de la producción de leche (Knapp et al. 2014). Se estimó que el impacto de esta estrategia de selección en un sistema lechero intensivo sería una reducción del 9-19 % en las emisiones de CO_2 -eq/kg de leche con corrección energética (Knapp et al., 2014). En otro estudio en vacas *lecheras*, la selección basada en el potencial genético para la producción de *leche* se asoció con una disminución de la fertilidad, un aumento de las vacas no productivas y un aumento general de las emisiones de CO_2 -eq para el sistema de producción (O'Brien et al., 2010). Otro estudio en vacas *lecheras* informó correlaciones genéticas bajas entre la producción de *metano* y los rasgos de fertilidad (Zetouni et al., 2018). Dados los informes contrastantes, es necesario realizar más estudios sobre la *eficiencia alimenticia*, la producción de *metano* y la fertilidad a lo largo de la vida en el ganado.

Los estudios anteriores también han demostrado la importancia de la selección de múltiples rasgos en los programas de reproducción del ganado de leche o carne y la necesidad de equilibrar la *eficiencia alimenticia* con otros rasgos comercialmente importantes, en particular la *fertilidad* (Bonamy et al., 2019).

Metano entérico en la evaluación del ciclo biológico del sistema de producción

El *metano entérico* forma parte del balance general de gases de efecto invernadero (*GEI*) de los sistemas de producción de carne y leche (Ibidhi & Calsamiglia, 2020). El balance de *GEI* incluye las emisiones de *metano*, óxido nitroso (N_2O) y CO_2 procedentes de la materia fecal, la producción de alimento, los vehículos y el transporte, y otras plantas y equipos. El balance total de *GEI* de un sistema de producción se determina mediante la metodología de evaluación del ciclo de vida (*ACV*) estandarizada por las normas ISO 14040 (ISO, 2006a) e ISO 14044 (ISO, 2006b) (de Vries et al., 2015; Kytä et al., 2022).

La contribución relativa de los diferentes componentes de los sistemas de producción al balance de *GEI* puede variar mucho según los diferentes sistemas de carne y leche. Una estimación para la producción de leche fue de *metano entérico* del 58,5 % (CH_4), producción de alimento del 29,4 % (CO_2 , N_2O) y materia fecal del 9,5 % (CH_4 , N_2O ; FAO, 2018). La contribución relativa del *metano entérico* puede alcanzar el 91% en sistemas de baja eficiencia (Chhabra et al., 2013).

La digestibilidad de los alimentos también puede tener un impacto importante en la contribución de *metano entérico* al balance general de *GEI* (Pinares-Patiño et al., 2007; FAO, 2019; Eugéne et al., 2021; Congio et al., 2022). Los rodeos con alta fertilidad y alta eficiencia productiva tienen un balance de *GEI*

reducido (Strandén et al., 2022). En rodeos de baja fertilidad, las vaquillonas de reposición pueden contribuir hasta un 27% al balance de *GEI* (Garnsworthy, 2004). La contribución de las vaquillonas de reposición disminuye al 10-12% en rodeos de alta fertilidad. Los rodeos de alta fertilidad con menos vaquillonas de reposición requieren menos producción de alimento y generan menos materia fecal, lo que reduce las emisiones de *metano* y óxido nitroso.

Conclusiones y perspectivas futuras

Abordar la producción de CH_4 entérico en la ganadería es un tema complejo que requiere la colaboración entre los investigadores y la industria. Las generaciones futuras de ganado se caracterizarán por una mayor eficiencia y fertilidad, lo que puede reducir la intensidad de las emisiones de CH_4 . Esto será el resultado de una selección equilibrada de múltiples rasgos.

Ha habido avances en el descubrimiento de *SNP* (*polimorfismos de un solo nucleótido*) para la eficiencia y la emisión de *metano* en el ganado. Estos *SNP* se incorporarán a la tecnología de reproducción asistida, como la *IA* y la *TE*, para la reproducción bovina con estándares de producción y ambientales definidas. La urgencia de pasar a la próxima generación de ganado vacuno supondrá un aumento en la producción de embriones de vaquillonas prepúberes genómicamente definidas. Esto reducirá el intervalo generacional y acelerará la tasa de mejora genética del ganado, definida por una mayor eficiencia, fertilidad y una menor emisión de CH_4 .

Recientemente se destacó la oportunidad que tiene el ganado de ser parte del manejo de los ecosistemas (Thompson et al., 2023). El desafío sigue siendo comunicar la importancia del ganado para la seguridad alimentaria y el medio ambiente (Manzano et al., 2023). 